



Universidad de San Carlos de Guatemala
Facultad de Ingeniería
Escuela de Estudios de Postgrado
Maestría en Energía y Ambiente

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS ECONÓMICO Y
AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE CHIQUIMULA**

Inga. Teri Elvira Osorio Rivas

Asesorado por el Mtro. Juan Carlos Fuentes Montepeque

Guatemala, septiembre de 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA



FACULTAD DE INGENIERÍA

**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS ECONÓMICO Y
AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE CHIQUIMULA**

TRABAJO DE GRADUACIÓN

PRESENTADO A LA JUNTA DIRECTIVA DE LA
FACULTAD DE INGENIERÍA
POR

INGA. TERI ELVIRA OSORIO RIVAS
ASESORADO POR EL MTRO. JUAN CARLOS FUENTES MONTEPEQUE

AL CONFERÍRSELE EL TÍTULO DE

MAESTRA EN ARTES EN ENERGÍA Y AMBIENTE

GUATEMALA, SEPTIEMBRE DE 2023

UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
FACULTAD DE INGENIERÍA



NÓMINA DE JUNTA DIRECTIVA

DECANO	Ing. José Francisco Gómez Rivera (a.i.)
VOCAL II	Ing. Mario Renato Escobedo Martínez
VOCAL III	Ing. José Milton de León Bran
VOCAL IV	Ing. Kevin Armando Cruz
VOCAL V	Br. Fernando José Paz González
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez

TRIBUNAL QUE PRACTICÓ EL EXAMEN GENERAL PRIVADO

DECANA	Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Darío Álvarez Cotí
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Juan Calos Fuentes Montepeque
EXAMINADOR	Mtro. Ing. Edgar Yanuario Laj Hun
SECRETARIO	Ing. Hugo Humberto Rivera Pérez



Guatemala, septiembre de 2023

LNG.EEP.OI.630.2023

En mi calidad de Directora de la Escuela de Estudios de Postgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer el dictamen del asesor, verificar la aprobación del Coordinador de Maestría y la aprobación del Área de Lingüística al trabajo de graduación titulado:

"ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS ECONÓMICO Y AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE CHIQUIMULA"

presentado por **Inga. Teri Elvira Osorio Rivas** correspondiente al programa de **Maestría en artes en Energía y ambiente**; apruebo y autorizo el mismo.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"



Mtra. Inga. Aurelia Anabela Cordova Estrada
Directora
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería

Decanato

Facultad de Ingeniería

24189101- 24189102

secretariadeceanato@ingenieria.usac.edu.gt

LNG.DECANATO.OI.630.2023

El Decano de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de San Carlos de Guatemala, luego de conocer la aprobación por parte del Director de la Escuela de Estudios de Posgrado, al Trabajo de Graduación titulado, **ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS ECONÓMICO Y AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE CHIQUIMULA**, presentado por: **Inga. Teri Elvira Osorio Rivas**, que pertenece al programa de Maestría en artes en Energía y ambiente después de haber culminado las revisiones previas bajo la responsabilidad de las instancias correspondientes, autoriza la impresión del mismo.

IMPRÍMASE:



Ing. José Francisco Gómez Rivera



UNIVERSIDAD DE SAN CARLOS DE GUATEMALA
DECANO a.i.
Facultad de Ingeniería

Decano a.i.

Guatemala, septiembre de 2023

JFGR/gaoc



Guatemala, 16 de octubre 2021

Como coordinador de la **Maestría en Artes en Energía y Ambiente** doy el aval correspondiente para la aprobación del Trabajo de Graduación titulado: "**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS ECONÓMICO Y AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE CHIQUIMULA**" presentado por **TERI ELVIRA OSORIO RIVAS** quien se identifica con carné **200011056**.

Atentamente,

"Id y Enseñad a Todos"

Mtro. Ing. Juan Carlos Fuentes Montepeque
Coordinador de Maestría
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería



Guatemala, 16 de octubre de 2021.

**Ingeniero M.Sc.
Edgar Álvarez Cotí
Director
Escuela de Estudios de Postgrado
Facultad de Ingeniería USAC
Ciudad Universitaria, Zona 12**

Distinguido Ingeniero Álvarez:

Atentamente me dirijo a usted para hacer de su conocimiento que como asesor del trabajo de graduación del estudiante Teri Elvira Osorio Rivas, Carné número 200011056, cuyo título es "**ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS ECONÓMICO Y AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE CHIQUIMULA**", para optar al grado académico de Maestro en Energía y Ambiente, he procedido a la revisión del INFORME FINAL y del ARTÍCULO.

En tal sentido, en calidad de asesor doy mi anuencia y aprobación para que el estudiante Osorio Rivas, continúe con los trámites correspondientes.

Sin otro particular, me es grato suscribirme de usted.

Atentamente,



Ing. Juan Carlos Fuentes M.
M.Sc. Hidrología y Recursos Hídricos
Asesor

Ing. Juan C. Fuentes M.
M.Sc. Hidrología
Colegiado No. 2,504

HONORABLE TRIBUNAL EXAMINADOR

En cumplimiento con los preceptos que establece la ley de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presento a su consideración mi trabajo de graduación titulado:

ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL DE ENERGÍA SOLAR Y SUS EFECTOS ECONÓMICO Y AMBIENTAL EN EL MUNICIPIO DE CHIQUIMULA

Tema que me fuera asignado por la Dirección de Escuela de Estudios de Postgrado con fecha 20 de noviembre de 2020.



Inga. Teri Elvira Osorio Rivas

ACTO QUE DEDICO A:

Dios	Por ser el pilar que sostiene cada uno de mis sueños y mi motivación para alcanzarlos.
Mis padres	Carlos Enrique Osorio Martínez (q. e. p. d.) e Irma Elizabeth Rivas Villafuerte por su amor y apoyo que será siempre mi inspiración.
Mi hijo	Josué Emmanuel Guerra Osorio por ser mi motor y quien me acompañó en cada página escrita.
Mis hermanos	Carolina, Marilyn y Charlie Osorio Rivas. Gracias por ser parte de mi vida.
Mis sobrinos	Fernanda y Saúl Marroquín Osorio y Julián Arroyo Osorio. Espero les sirva de inspiración para seguir adelante y no permitir que nada los detenga.

AGRADECIMIENTOS A:

La Universidad de San Carlos de Guatemala	Mi alma Mater, por permitirme descubrir mi vocación, nunca me cansaré de aprender y compartir conocimiento.
Facultad de Ingeniería	Por cada una de las oportunidades que me brindó para descubrir y materializar mis sueños.
Escuela de Estudios de Postgrado	Por compartir conmigo dificultades, retos, alegrías y este momento.
Mis amigos	Por estar listos para saltar el siguiente obstáculo en la carrera, sin miedo al éxito.

ÍNDICE GENERAL

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES	V
LISTA DE SÍMBOLOS	IX
GLOSARIO.....	XI
RESUMEN.....	XV
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	XVII
OBJETIVOS	XIX
RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO	XXI
INTRODUCCIÓN.....	XXIII
1. MARCO TEÓRICO.....	1
1.1. Antecedentes de la investigación.....	1
1.2. Energía solar	4
1.2.1. Radiación solar	4
1.2.2. Espectro solar	7
1.2.3. Radiación solar sobre una superficie horizontal	15
1.2.4. Radiación solar sobre una superficie inclinada.....	16
1.3. Energía solar fotovoltaica	17
1.3.1. ¿Qué es la energía solar fotovoltaica?	17
1.3.2. Funcionamiento de tecnología fotovoltaica	18
1.3.3. Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos	23
1.3.4. Análisis financiero	26
1.3.5. Análisis ambiental	27
2. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR	31
2.1. Estación meteorológica.....	31

2.2.	Análisis estadístico de datos meteorológicos	33
2.3.	Estimación y clasificación de potencial solar	37
	2.3.1. Clasificación del potencial solar mensual.....	40
3.	DISEÑO DE PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA.....	41
3.1.	Análisis para el diseño de una planta solar fotovoltaica.....	41
	3.1.1. Localización de terreno.....	41
	3.1.2. Equipo	42
	3.1.3. Estimación del número de paneles	57
	3.1.4. Estimación de producción.....	57
3.2.	Estimación de inversión inicial, costos e ingresos	60
	3.2.1. Inversión inicial	60
	3.2.1.1. Equipo	60
	3.2.1.2. Terreno	61
	3.2.1.3. Construcción.....	61
	3.2.2. Costos fijos.....	63
3.3.	Proyección de ingresos	64
4.	ANÁLISIS FINANCIERO Y AMBIENTAL	67
4.1.	Análisis financiero	67
4.2.	Análisis ambiental	68
5.	RESULTADOS	73
5.1.	Estimación y clasificación del potencial solar	73
	5.1.1. Clasificación del potencial solar mensual.....	74
5.2.	Diseño de planta solar fotovoltaica.....	75
5.3.	Análisis financiero y ambiental	76
	5.3.1. Análisis financiero.....	76
	5.3.2. Análisis ambiental.....	77

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS	79
CONCLUSIONES	83
RECOMENDACIONES	85
REFERENCIAS	87
APÉNDICES	91

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

FIGURAS

Figura 1.	Órbita de la tierra alrededor del sol	5
Figura 2.	Vista de la atmósfera entre el sol y la tierra.....	7
Figura 3.	Vista de ángulos entre el sol y la tierra.....	12
Figura 4.	Heliógrafo de tipo Campbell Stockes	13
Figura 5.	Pirhelímetro.....	14
Figura 6.	Piranómetro	15
Figura 7.	Módulo Fotovoltaico y sus partes	20
Figura 8.	Las partes de una batería	21
Figura 9.	Diagrama de la ubicación de un controlador de carga solar	22
Figura 10.	Inversor.....	23
Figura 11.	Esquema de fuentes de emisión y alcances.....	28
Figura 12.	Mapa con la ubicación de la estación meteorológica.....	32
Figura 13.	Gráfica del promedio mensual de radiación solar en Wh/m ²	34
Figura 14.	Descomposición de series de tiempo de radiación solar (W/m ²). Multiplicativo	38
Figura 15.	Gráfico del pronóstico de radiación solar promedio.....	39
Figura 16.	Ubicación de terreno para planta fotovoltaica.....	42
Figura 17.	Panel fotovoltaico.....	44
Figura 18.	Modelo de microinversor.....	45
Figura 19.	Regulador de voltaje VICTRON modelo MMPT Smart Solar 250V 100A.....	46
Figura 20.	Batería Solar-One HUP SO-6-85-23 48V Flooded Battery.	47
Figura 21.	Inversor Phoenix 48/5000VA.....	48

Figura 22.	Sistema de distribución de una red eléctrica.....	49
Figura 23.	Esquema de transformadores de MW	50
Figura 24.	Transformador de distribución del modelo PROLEC GE	51
Figura 25.	Sistema de montura triangular flexible.....	52
Figura 26.	Componentes del modelo SCADA en la producción de energía solar	53
Figura 27.	Esquema de distribución de información en el programa Conext Advisor 2	54
Figura 28.	Panel de interruptores de CA Eaton Group-Mounted Switchboard	55
Figura 29.	Catálogo de empresa RCT con sección de cables según aislante.....	56
Figura 30.	Gráfica de TIR/VAN.....	68
Figura 31.	Gráfica de composición de la matriz energética por tipo de tecnología.....	69
Figura 32.	Gráfico del promedio real y el pronóstico de radiación solar (Wh/m ²)	74
Figura 33.	Clasificación del potencial solar	75
Figura 34.	Gráfica de TIR/VAN.....	77
Figura 35.	Emisiones de Kg CO ₂ e según fuente de producción.....	78
Figura 36.	Gráfico Evolución de la matriz energética 2007 al 2014.....	81
Figura 37.	Matriz de generación de energía eléctrica, de la semana 36 a la 39 del 2021	82

TABLAS

Tabla 1.	Promedio mensual de radiación solar Wh/m ²	33
Tabla 2.	Tabla de resultados para el análisis de los modelos de series temporales	35

Tabla 3.	Índices estacionales.....	36
Tabla 4.	Medidas de exactitud	36
Tabla 5.	Pronóstico mensual radiación solar.....	37
Tabla 6.	Pronóstico del promedio mensual radiación solar Wh/m ²	39
Tabla 7.	Clasificación de la radiación solar	40
Tabla 8.	Características principales de panel fotovoltaico LG335N1CA5 ...	43
Tabla 9.	Especificaciones de microinversor Enphase modelo IQ 7	45
Tabla 10.	Características de cables a utilizar.....	57
Tabla 11.	Estimación de la producción de energía de un panel solar.....	58
Tabla 12.	Resumen del equipo requerido	59
Tabla 13.	Descripción del costo del equipo seleccionado	61
Tabla 14.	Salarios para la construcción de la planta	62
Tabla 15.	Costo en asesoría y expertos.....	62
Tabla 16.	Resumen inversión inicial	63
Tabla 17.	Descripción de montos salariales anuales para empleados de la planta	64
Tabla 18.	Producción e ingresos de la planta solar.....	65
Tabla 19.	Flujo de caja y estimación de TIR y VAN	67
Tabla 20.	Coeficientes de emisiones de CO ₂ e por tipo de combustible.....	70
Tabla 21.	Emisiones de GEI en Kg CO ₂ e de generación por tipo de combustible.....	70
Tabla 22.	Promedio real y pronóstico radiación solar Wh/m ²	73
Tabla 23.	Inversión inicial, costo operativo e ingresos proyectados.	76

LISTA DE SÍMBOLOS

Símbolo	Significado
CA	Corriente alterna
CC	Corriente continua
MSD	Desviación cuadrática media
MAD	Desviación media absoluta
CO₂	Dióxido de carbono
CO_{2eq}	Dióxido de carbono equivalente
MAPE	Error porcentual absoluto medio
°C	Grados celsius
kW	Kilovatios
kWh	Kilovatios hora
Lm	Lúmenes
MW	Megavatios
m	Metros
W	Vatios
W_p	Watios pico

X

GLOSARIO

Eficiencia	La eficiencia de un panel solar se refiere a la cantidad de energía solar que recibe la superficie de un panel y se convierte en energía.
Energía eléctrica	Es la potencia eléctrica producida, transmitida o consumida en un período determinado. Se mide y se expresa en vatio hora (Wh) o en sus múltiplos: kilovatio hora (kWh), megavatio hora (MWh), gigavatio hora (GWh), teravatio hora (TWh). Se transmite por medio de ondas electromagnética.
GEI	Gases de Efecto Invernadero.
Hora solar	Número de horas diarias que con una irradiación solar ideal de 1 000 vatios por metro cuadrado proporciona la misma irradiación solar total que la real de ese día.
Inversor	Dispositivo que convierte la energía de corriente continua procedente del generador fotovoltaico en corriente alterna.
Lámpara	Aparato mediante el cual se transforma la energía eléctrica en energía luminosa.

MAD	Desviación absoluta media. Es la distancia promedio que hay entre cada dato y la media.
MAPE	Error porcentual absoluto medio. Es un indicador del desempeño de un pronóstico, que mide el tamaño del error absoluto en términos porcentuales.
MSD	Desviación cuadrática media. Su valor es la medida de la exactitud de los valores ajustados en las series de tiempo.
Panel solar	Dispositivo que aprovecha la energía de la radiación solar, para generar electricidad mediante energía solar fotovoltaica.
Radiación solar	Es la energía emitida por el sol.
Sistema eléctrico	Es el conjunto de actividades, procesos, instalaciones, equipos y dispositivos que se articulan e interconectan de manera sistémica y continua para prestar un servicio eléctrico de calidad, a los niveles de tensión requeridos por los usuarios.
Sistema independiente	Es parte del Sistema Eléctrico Nacional, conformado por instalaciones no conectadas al mismo destinadas a la prestación del servicio en zonas no servidas.
TIR	Tasa Interna de Retorno. Es la tasa de interés máxima a la se puede endeudarse para financiar un proyecto.

VAN	Valor Actual Neto. Es una herramienta que permite determinar la viabilidad económica de un proyecto.
Vatio	Unidad de potencia del Sistema Internacional de Unidades, su símbolo es W, equivalente a 1 joule por segundo (1 J/s).

RESUMEN

Se estableció el potencial de energía solar en el municipio de Chiquimula y sus efectos económicos y ambientales. Como primer paso se cuantificó el potencial de generación de energía solar, para estimar la inversión, los beneficios de un proyecto de generación solar fotovoltaica y el impacto en la reducción de emisión de gases efecto invernadero.

Se obtuvo una base de datos de variables climáticas de la estación meteorológica ubicada en el centro universitario de oriente, específicamente se estudió la radiación solar, desde el 2012 hasta el 2020. Estos datos se procesaron por medio de ocho modelos de series temporales a través del software MiniTab, analizando los resultados se determinó que el modelo que mejor se ajusta es el de descomposición de series de tiempo con modelo multiplicativo y tendencia más estacional. Con el pronóstico obtenido se diseñó una planta solar fotovoltaica que cubriera la demanda media indicada por el mercado mayorista.

Para el diseño se realizó la selección de la ubicación del terreno, verificando que sea un lugar accesible. Se seleccionó el equipo idóneo para cubrir la demanda requerida, tomando en cuenta eficiencias, pérdidas y garantías de estos. Definiendo la inversión inicial a nivel de prefactibilidad, se evaluaron los posibles costos, ingresos y egresos del proyecto, mostrando una oportunidad de inversión.

Con los resultados del diseño, se evaluó la tasa interna de retorno y el valor presente neto sobre la inversión en una planta solar y el beneficio ambiental

obtenido al dejar de generar emisiones de CO₂ a través de los coeficientes de emisiones de la generación eléctrica por tipos de combustible, proporcionado por el Ministerio de Energía y Minas.

Con lo que se concluyó que el potencial solar en el área de estudio es excelente siete meses del año y es buena en los otros cinco meses, teniendo un promedio anual de 6.83 kWh/m². La tasa interna de retorno es de 9.63 % para alcanzar el punto de equilibrio en el año ocho, tomando en cuenta que tendría un contrato por quince años. La cantidad de emisiones de gases efecto invernadero que se evitarían al generar la demanda de energía eléctrica a través de energía solar son 5080 Kg CO₂e por día, lo que representa 1,828 Ton CO₂e en el año.

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En la actualidad se están viviendo cambios constantes en el precio de los combustibles fósiles y el creciente aumento de la contaminación del medio ambiente, causada por las emisiones de gases efecto invernadero –GEI–, el país depende de la generación de energía en un alto porcentaje de dichos combustibles y como consecuencia estamos viviendo el cambio climático, lo que hace necesario que la matriz energética actual se diversifique a través del componente de energía solar.

De acuerdo con la composición de la matriz energética actual el porcentaje de participación de energía solar es bajo, según el Ministerio de Energía y Minas (MEM, 2017) el aporte que ha tenido la tecnología para la generación de energía solar fue de un 1.75 %, a pesar de contar con un valor promedio anual de irradiación solar global para todo el país de 5.3 kWh/m²/día.

La resistencia al cambio no permite crear conciencia para minimizar los efectos ambientales como el agotamiento de los recursos naturales para generar energía eléctrica, contando con recursos renovables, como lo es la radiación solar, que nos permite la generación de energía limpia.

Se desconocen los datos específicos sobre la radiación global, que es la radiación solar total, que recibe el área urbana de Chiquimula. La radiación global es la suma de: radiación directa, radiación difusa y albedo, esto sucede porque no existe apoyo a la investigación y realización de los cambios necesarios en la matriz energética, y así poder generar energía limpia y reducir los efectos ambientales.

Las políticas de estado que incentiven la producción de energías renovables son prácticamente inexistentes ya que no se ejecutan según su diseño. Por lo que es necesario contar con políticas más específicas y así dinamizar el mercado potencial que existe en la producción de energía solar, para atraer inversores en este campo inexplotado.

En consecuencia, el lugar con potencial solar para los propósitos de esta investigación es el Municipio de Chiquimula.

Esto lleva a plantear la pregunta principal de esta investigación: ¿Cuál es el potencial solar en el municipio de Chiquimula y sus efectos económicos y ambientales?

Para responder a esta interrogante se deberán contestar las siguientes preguntas auxiliares:

- ¿Cuál es el potencial de generación de energía solar en el municipio de Chiquimula?
- ¿Cuál sería la estimación en reducción de CO₂ al aprovechar el potencial solar?
- ¿Cuáles serían los beneficios y la inversión de un proyecto de generación de energía solar?

OBJETIVOS

General

Establecer el potencial de energía solar en el municipio de Chiquimula y sus efectos económicos y ambientales.

Específicos

1. Cuantificar el potencial de generación de energía solar en el municipio de Chiquimula.
2. Analizar la reducción de CO₂ al aprovechar el potencial solar.
3. Estimar la inversión y los beneficios de un proyecto de generación de energía solar fotovoltaico.

RESUMEN DEL MARCO METODOLÓGICO

El presente estudio se considera de tipo cuantitativo descriptivo, en él se utilizaron diferentes variables meteorológicas, suministradas por la estación meteorológica del Centro Universitario de Oriente -CUNORI- que pertenece a la Universidad de San Carlos de Guatemala y está ubicado en el municipio de Chiquimula. Esta fue seleccionada por ser la estación meteorológica que cuenta con el equipo para la medición de la radiación solar, temperatura, humedad y horas de sol, así también por su ubicación. Los datos empleados en el estudio corresponden al valor diario por cada hora del periodo de tiempo comprendido entre enero de 2012 y septiembre de 2019.

Como primer paso se ordenó la información meteorológica, para procesarla y como resultado obtener las parejas de datos utilizadas en las series temporales planteadas. Se realizó un análisis estadístico con los datos diarios por mes, para establecer las series temporales de las variables. Como siguiente paso se realizó la verificación y el análisis para la selección de las series y su intervalo temporal, así se determinó la selección de las series temporales y se realizó un análisis estadístico de las principales series temporales, y se calculó el potencial solar mensual existente en el área de estudio.

Con este dato se determinó la clasificación de potencial solar mensual para Chiquimula, según la tabla de clasificación de potencial solar del Nuevo Modelo de Estadísticas Energéticas en Guatemala proporcionado por el Ministerio de Energía y Minas.

Luego se realizaron los cálculos para establecer el potencial solar fotovoltaico y térmico, así como un estudio sobre la inversión para la implementación de una planta solar fotovoltaica. Finalmente se elaboró un análisis ambiental con el que se determinó la reducción en las emisiones de CO₂ al implementar dicha planta.

INTRODUCCIÓN

La humanidad ha progresado por el aprovechamiento de las fuentes primarias de energía que la naturaleza brinda, esto ha causado el consumo excesivo de energía para satisfacer las necesidades de confort en la actualidad, lo que provoca efectos perjudiciales cada vez más intensos en el medio ambiente y así se van agotando los recursos naturales para generar energía eléctrica. El desconocimiento de los datos del potencial solar existente en áreas específicas no permite desarrollar nuevos proyectos para la generación de energía eléctrica a través de fuentes renovables, como lo es la radiación solar, que nos permite la generación de energía limpia.

La importancia de este trabajo radica en contar con la estimación del potencial solar para lograr el aprovechamiento del recurso renovable y asegurar la sustentabilidad energética, que está definida como el equilibrio entre tres dimensiones principales: la seguridad energética, la equidad social y la mitigación del impacto ambiental, según World Energy Council (WEC). El conocimiento del potencial energético solar es un aspecto relevante para desarrollar nuevas alternativas energéticas, específicamente el potencial solar existente en Chiquimula.

Se realizó la estimación del potencial solar en Chiquimula lo que abrirá una puerta para inversionistas locales e internacionales para el desarrollo de proyectos de generación de energía eléctrica con conciencia ambiental. También se efectuaron los análisis financiero y ambiental para establecer un proyecto de generación de energía solar fotovoltaica para cubrir la demanda de energía en el área. Esta propuesta logrará mostrar la estimación de la reducción de emisiones

de gases efecto invernadero, lo que mostrará una forma para diversificar la matriz energética del país.

El potencial para la generación de energía solar en el municipio de Chiquimula se clasifica como excelente durante siete meses de año y los otros cinco meses se clasificó como buena. El diseño de la planta solar fotovoltaica para cubrir la demanda del municipio muestra beneficios económicos y ambientales significativos.

En el capítulo 1, se incluyen los antecedentes de la investigación. En el capítulo 2, se analizaron los datos obtenidos de la estación meteorológica a través de ocho modelos de series temporales, identificando el modelo de descomposición de series de tiempo con modelo multiplicativo y tendencia más estacional es el que mejor se ajusta a dicha serie de datos. Como resultado se obtuvo el pronóstico mensual de la radiación solar en el municipio y se realizó la clasificación según el nuevo modelo de estadísticas energéticas en Guatemala.

En el capítulo 3, se presenta el diseño de una planta solar fotovoltaica que cubre la demanda del municipio. En el capítulo 4, se analizan los efectos económicos al establecer un proyecto para generación de energía solar fotovoltaica y el efecto ambiental que tendrá en la reducción de emisiones de gases efecto invernadero. En los capítulos 5 y 6, se presentarán los resultados más relevantes de la investigación y la discusión de estos respectivamente.

Finalmente se concluye que el potencial para la generación de energía solar en el municipio de Chiquimula es de 6.83 W/m^2 . Teniendo la mayor radiación solar en el mes de abril, alcanzando los 7.94 W/m^2 y la menor radiación solar en el mes de diciembre con 5.32 W/m^2 . Estos datos hacen que se clasifique entre el rango de buena y excelente para la generación de energía fotovoltaica.

El análisis financiero indica que en ocho años se recupera la inversión inicial y permite una tasa interna de retorno de 9.5 %, mostrando la viabilidad de este. Las emisiones de CO₂ que se evitarían con el aprovechamiento del recurso solar sería de 1,828 Ton CO₂e anuales, considerado un fuerte beneficio ambiental, para la reducción de GEI.

1. MARCO TEÓRICO

1.1. Antecedentes de la investigación

Tomando en cuenta algunos de estudios relacionados que se encontraron en Guatemala, que describen la energía solar como una opción viable para la generación de energía eléctrica que aporta impactos positivos en el ámbito económico y ambiental. Se describe un breve fragmento de cada estudio relacionado que se consultó para la elaboración de este texto.

Florián (2015), de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el trabajo de graduación titulado *Estudio de Factibilidad para el uso de energía solar, como una alternativa energética, en la industria guatemalteca*, tenía como objetivo principal determinar la viabilidad de utilizar energía solar como otra opción para proveer energía en la industria del país, dentro del estudio de investigación se incluyó el estudio de mercado, estudio técnico, estudio jurídico administrativo, estudio ambiental, estudio económico y estudio financiero. Los resultados de dicho estudio mostraron la factibilidad de utilizar energía solar en Guatemala; específicamente en la evaluación ambiental, se encontró que el uso de sistemas fotovoltaicos reduce significativamente las emisiones de CO₂ en 1 kg de CO₂/kWh, además presentó la *Ley de Energías Renovables*, los equipos utilizados en una planta de energía solar con tecnología fotovoltaica y los costos asociados.

Alvarado (2017), de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en el trabajo de graduación titulado *Diseño preliminar de los sistemas de generación fotovoltaica y su protección eléctrica para los edificios de la escuela de ciencias*

de la comunicación de la Universidad de San Carlos de Guatemala, presentó un diseño que explica la importancia de la eficiencia en el consumo de energía, evalúa la viabilidad a nivel técnico y económico para la implementación del sistema de generación de energía solar y su protección eléctrica, en los edificios de la Facultad de Ciencias de la Comunicación S7 y M2, asimismo da a conocer las diferentes formas en las que pueden funcionar los sistemas de generación fotovoltaico: como usuario que vende lo que genera adicional a su consumo, como generador no conectado y como generador conectado a la red. Al mismo tiempo, incluye el diseño de un programa de capacitación para el uso y mantenimiento de las instalaciones del proyecto.

Catalán (2014), de la Universidad de San Carlos de Guatemala, en su trabajo de graduación titulado *Estudio de prefactibilidad técnica y económica e inserción al mercado eléctrico guatemalteco de una planta fotovoltaica de 1MW*, hizo un estudio que se basó en dar a conocer una nueva alternativa energética que ayude a diversificar la matriz energética del sistema guatemalteco, describe el análisis de las variables económicas particulares del caso de Guatemala relacionadas con la tasa interna de rendimiento, las tasas de interés esperadas por el inversionista y el valor presente. Todos los cálculos se realizaron a través de instrumentos tecnológicos y datos meteorológicos, se describen dentro del informe los requisitos para el ingreso en el mercado eléctrico de Guatemala y la importancia del cambio en las fuentes para producir energía y la reducción de emisiones. El resultado fue que la ejecución de un proyecto fotovoltaico es rentable y la región que cumple con la mejor combinación de parámetros para el desarrollo del proyecto se identifica un área en el oriente del país.

En otros países se encontraron estudios interesantes relacionados con el tema y a continuación se presentan:

Posso, González, Guerra y Gómez (2013) publicaron en la Revista Geográfica Venezolana el artículo titulado *Estimación del potencial de energía solar en Venezuela utilizando sistemas de información geográfica*, donde la información básica consistió en la recolección de registros de radiación solar de 35 estaciones meteorológicas, mostrando que existe un potencial de aprovechamiento de energía solar factible, con valores arriba de 5.1 kWh/m² día (radiación promedio en Venezuela), en una extensión aproximada de 205,921.6 km² (20 % del territorio), generaron mapas a una resolución de 4 km utilizando Kriging Ordinario, determinaron una alta variación aleatoria en el modelo (2,7 a 7,3 kWh/m²). Concluyeron que existen áreas sin acceso con potencial solar mayor al promedio, para lo cual utilizaron programas de geoestadística y sistemas de información geográfica (GIS).

Pérez, Cervantes, Mozetic, Morell y Martín (2011) en el Instituto para la Diversificación y Ahorro de la Energía, España, realizaron una investigación titulada *Evaluación del potencial de energía solar térmica y fotovoltaica derivado del cumplimiento del Código Técnico de Edificación. Estudio Técnico PER 2011-2020*, específicamente analizaron el potencial del uso de energía solar térmica para producir agua caliente sanitaria, climatización de piscinas y el potencial del uso de energía solar fotovoltaica conectada a la red. En relación con la producción de energía determinaron a través de estas dos tecnologías, las pérdidas y la utilidad de estas. En el caso de la energía solar fotovoltaica se vende a la red ya que está sujeta a tarifa, la energía solar térmica depende del uso que le darán en el edificio o vivienda, el funcionamiento y el mantenimiento de la infraestructura. El crecimiento de producción de energía con tecnología solar térmica es constante y llegará a superar los 2.000 GWh en 2020.

1.2. Energía solar

La energía solar proviene del Sol, da vida a los seres humanos y a todos los organismos vivos del planeta Tierra. El Sol es responsable de todas las fuentes de energía renovables de la Tierra, que satisfacen las necesidades del ser humano. La radiación solar es una onda electromagnética con una longitud de onda entre 0.30 y 3 μm , así como fotones en una longitud de onda visible.

1.2.1. Radiación solar

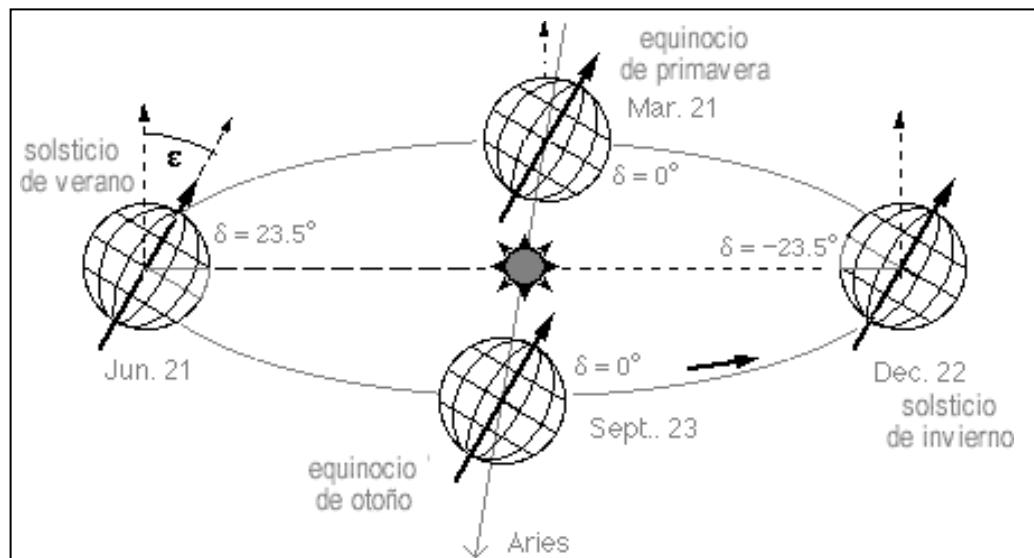
- Concepto básico de energía
 - Cada día la energía es una de las necesidades más grandes de la sociedad, y en constante aumento la demanda y la oferta de esta.
 - La energía existente se transforma constantemente, de acuerdo con las necesidades a cubrir.
 - La relación que existe entre el desarrollo económico, el medio ambiente y la energía es muy estrecha, esto debido a que, a mayor desarrollo económico, existe mayor demanda de energía y esto requiere considerar los efectos al medio ambiente para tener un crecimiento económico sostenible.
- Fuente de energía solar

El sol es la fuente de la energía solar, es la estrella más grande del sistema solar. Su luz da vida, calor y mantiene unido el sistema solar, tiene un diámetro de $1.39 \times 10^9 \text{ m}$, se encuentra a una distancia promedio de $1.5 \times 10^{11} \text{ m}$ de la tierra. El sol gira sobre su eje aproximadamente una vez cada 4 semanas, el 90 % de la energía del Sol se genera en una región esférica que tiene un radio de 0.23

veces el radio del Sol. La densidad media (ρ) y la temperatura (T) en esta región son 10^5 kg/m^3 y aproximadamente $(8-40)\times 10^6 \text{ K}$, respectivamente. La energía generada en la región se debe a varias reacciones de fusión. En la fusión, dos moléculas de hidrógeno (es decir, cuatro protones) se combinan para formar un núcleo de helio a aproximadamente 10^7 K .

La tierra tiene diferentes inclinaciones al recorrer la órbita del sol, como se puede observar en la figura 1. Esto es lo que marca las estaciones durante el año.

Figura 1.
Órbita de la tierra alrededor del sol



Nota. La tierra orbita alrededor del Sol, experimentando cambios estacionales debido a la inclinación axial que determina la cantidad de energía solar recibida en diferentes regiones a lo largo del año. Obtenido de G. Tiwari, A. Tiwari y Shyam (2016). *Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications*. (p. 5.). Springer.

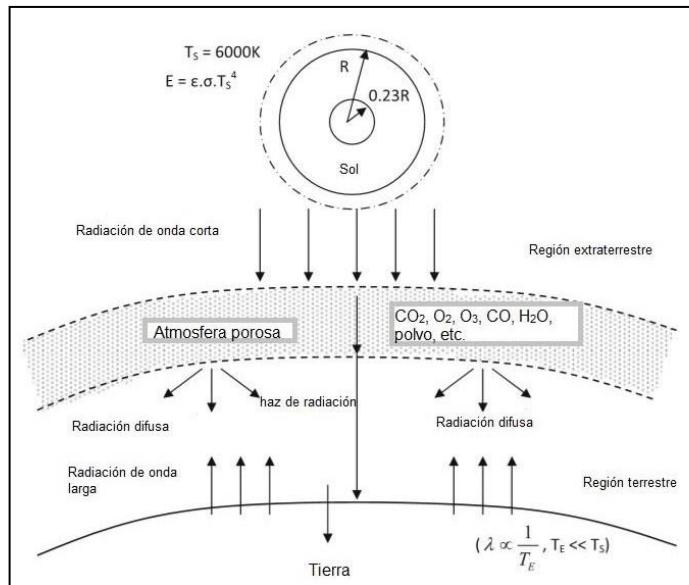
- Formación de la atmósfera

La región de gases estables entre el sol y la tierra se conoce como atmósfera, está compuesta por la homosfera y heterosfera. La gravedad es la que mantiene la atmósfera en su lugar y evita que se difunda al espacio exterior. La homosfera está ubicada en los primeros 80 a 100 km de altura, con una composición homogénea. La heterosfera se encuentra por encima de los 80 a 100 km y en esta capa domina la difusión molecular y la gravedad es capaz de separar todo.

La atmósfera tiene dos propiedades únicas, la primera es que transmite radiación de longitud de onda corta (0.23-2.26 μm) proveniente del sol y la segunda es que se comporta como opaco para radiación de longitud de onda larga ($> 2.26 \mu\text{m}$). La región entre el sol y la atmósfera se conoce como la región extraterrestre. La región terrestre se define como el área entre la atmósfera y la tierra, como se puede observar en la figura 2.

Figura 2.

Vista de la atmósfera entre el sol y la tierra



Nota. El espacio entre el Sol y la Tierra se compone de partículas solares, campos magnéticos y radiación. Obtenido de G. Tiwari, A. Tiwari y Shyam (2016). *Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications.* (p. 5.). Springer.

La luz solar de onda corta ilumina la mitad de la tierra, que se encuentra en constante movimiento alrededor de su eje, el que está inclinado (23.5 °). El albedo es la radiación solar reflejada que regresa al espacio, la cantidad depende del tipo de suelo, la cobertura de las plantaciones sobre la superficie de la Tierra y la distribución de las nubes.

1.2.2. Espectro solar

La radiación solar que tiene una longitud de onda de cero a infinito es el espectro solar emitido por el sol, se obtiene debido al efecto combinado de la radiación solar emitida y absorbida en diferentes capas.

Según Tiwari *et al.* (2016) Ley de Planck indica que la intensidad de la radiación emitida por un cuerpo negro con una temperatura T viene dada por la fórmula:

$$I(\nu, T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{\exp(h\nu/kT) - 1}$$

Ec. 1

Donde:

$I(\nu)\delta\nu$ = es la cantidad de energía por unidad de área, unidad de tiempo y unidad de ángulo sólido emitida en el rango de frecuencias entre ν y $\nu + \delta\nu$

h = es una constante que se conoce como constante de Planck

c = es la velocidad de la luz

k = es la constante de Stefan-Boltzmann

La longitud de onda en la que se produce el máximo de emisión viene dada por la ley de Wien y la potencia total emitida por unidad de área viene dada por la ley de Stefan-Boltzmann. Por lo tanto, a medida que la temperatura aumenta el brillo de un cuerpo cambia.

- Constante solar

Debido a la órbita elíptica del movimiento de la tierra alrededor del sol, la distancia entre el sol y la tierra no es fija, sino que varía a lo largo del año y la variación máxima es de hasta 1.7 %. La intensidad solar (radiación solar / irradiancia solar) en la región extraterrestre ha sido medida (por la NASA a través de satélite). Para el enésimo día del año, la intensidad solar en un plano perpendicular a la dirección de la radiación solar viene dada por:

$$I_{ext} = I_{sc} \left[1.0 + 0.033 \cos \cos \left(\frac{360n}{365} \right) \right]$$

Ec. 2

Donde:

I_{sc} = es la constante solar definida como el flujo solar radiante recibido en la región extraterrestre en un plano de área unitaria que se mantiene perpendicular a la radiación solar a la distancia media entre el sol y la tierra. El valor promedio de la constante solar es 1367 W/m^2

- Masa de aire

La masa de aire es la relación existente entre los caminos recorridos por la radiación solar a través de la atmósfera y la masa recorrida por la radiación solar si el sol está en su zenit. Cuando la radiación atraviesa la atmósfera compuesta por gases efecto invernadero, se produce una atenuación atmosférica. La cantidad de atenuación está dada por la masa de aire. Para el mediodía, esta relación es la unidad. Los valores mayores de masa de aire implican una mayor atenuación.

- Tiempo de sol

El tiempo de sol es un registro del tiempo con referencia a la posición del sol en un día completo. El tiempo de sol es de dos tipos: hora solar aparente y hora solar estándar (hora dada por el reloj). La diferencia en minutos entre la hora solar aparente y la hora estándar es:

$$\text{hora solar} - \text{hora estándar} = 4(L_{st} - L_{loc}) + E$$

Ec. 3

Donde:

L_{st} = representa el meridiano de la zona horaria local

L_{loc} = es la longitud del lugar en cuestión

E = es la ecuación de tiempo (en minutos), que viene dada por la expresión:

$$E = 229.2 (0.000075 + 0.001868 \cos B - 0.032077 \sin B - 0.014615 \cos 2B - 0.04089 \sin 2B)$$

Ec. 4

Donde:

$$B = (n - 1) \times 360/365$$

Ec. 5

- Ángulo del sol con la tierra

Los ángulos entre el sol y la tierra son clave para la estimación de la intensidad solar durante todo el año para cualquier superficie en cualquier lugar con la inclinación y orientación deseadas. Estos ángulos sol – tierra son:

- Latitud (ϕ): es la ubicación del observador en la superficie de la tierra, es el ángulo formado entre la línea radial que une a la ubicación del observador con el centro de la tierra y su proyección en el plano ecuatorial. Para un observador en el hemisferio norte, la latitud es positiva, mientras que para el hemisferio sur es negativa.
- Declinación (δ): es el ángulo entre la línea que une los centros del sol y la tierra, que también determina la dirección de los rayos directos provenientes del sol y su proyección en el plano ecuatorial. La declinación se debe a la rotación de la tierra alrededor de un eje,

que forma un ángulo de 66.5 con el plano o de 23.5 ° con la rotación normal alrededor del sol.

- Ángulo según la hora (ω): es el movimiento angular del sol desde el meridiano local debido a la rotación de la tierra alrededor de su propio eje.
- Zenit (θ_z): Zenit es el punto del hemisferio celeste (SOL) ubicado sobre la vertical del observador. La línea perpendicular a un plano horizontal se conoce como el ángulo zenital.
- Altitud(α): es el ángulo formado entre un plano horizontal y los rayos del sol se conoce como altitud. Su valor numérico se considera positivo para la pendiente hacia el sur y negativo para la pendiente hacia el norte.
- Ángulo azimutal de superficie (γ): es el ángulo formado entre la línea hacia el sur y la proyección de la normal a la superficie inclinada en el plano horizontal. En el hemisferio norte, convencionalmente el ángulo azimutal de superficie es negativo (positivo para el hemisferio sur) para las proyecciones en el este del sur y positivo (negativo para el hemisferio sur) para las proyecciones que caen al oeste del sur.
- Ángulo azimutal solar (γ_s): es el ángulo formado entre la proyección de la radiación del haz en el plano horizontal y la línea que va hacia el sur.

- Hora de sol (N): es la duración total en horas del movimiento del sol desde el amanecer hasta el atardecer. Se define en términos del ángulo horario como

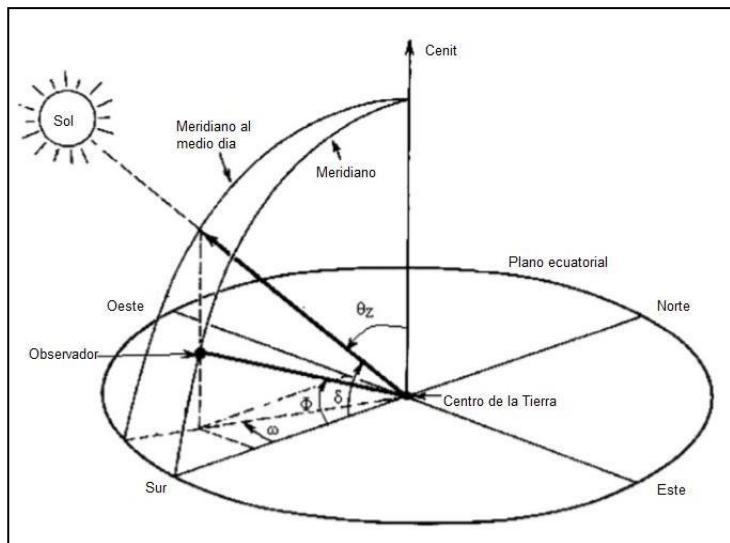
$$N = \frac{2\omega S}{15}$$

Ec. 6

- Ángulo de incidencia(θ_i): es el ángulo formado entre la normal a la superficie inclinada y el haz de la radiación solar que cae sobre la superficie inclinada.

Figura 3.

Vista de ángulos entre el sol y la tierra.



Nota. El ángulo entre el Sol y la Tierra varía a lo largo del día y las estaciones, influyendo en la cantidad de energía solar recibida. Obtenido de G. Tiwari, A. Tiwari y Shyam (2016). *Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications*. (p. 5.). Springer.

- Instrumentos para medir la radiación solar

Para medir la radiación solar es necesario definir qué componente se desea medir, esta decisión será la clave para determinar el tipo de instrumento que se debe utilizar.

- Heliógrafo: se usa para medir el tiempo que tarda la luz y con el heliógrafo se puede delimitar el intervalo de tiempo que se ve el sol y se mide el lapso durante el cual la intensidad de la radiación directa del día es mayor a un punto definido.

Figura 4.

Heliógrafo de tipo Campbell Stokes



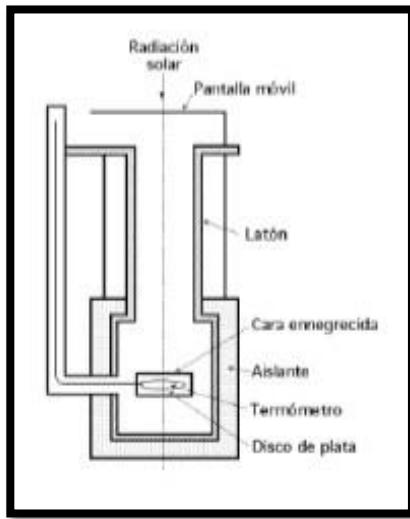
Nota. El heliógrafo Campbell-Stockes es un dispositivo meteorológico que utiliza una lente para concentrar la luz solar. Obtenido de A. Müller (2013). *Heliógrafos Tipo Campbell-Stokes.* R. FUESS.

- Pirhelímetro: sirve para medir la radiación solar directa. Cuenta con una abertura colimada y una superficie receptora, que siempre debe mantenerse perpendicular a los rayos del sol.

El pirhelímetro recibe la energía sólo del disco solar y de un estrecho anillo de cielo contiguo, a través de un tubo largo; este instrumento está programado para seguir el movimiento del sol.

Figura 5.

Pirhelímetro



Nota. El pirhelímetro es un instrumento de medición que mide la radiación solar directa con alta precisión. Obtenido de P. Fernández, (s.f.). *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura.* (<https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=3>). Consultado el 18 de septiembre de 2022. De dominio público.

- Piranómetro: el piranómetro se usa para medir todas las radiaciones (global, directa y difusa), en todas las direcciones. El instrumento debe colocarse sobre una base horizontal. El rango de la banda de

frecuencias media del piranómetro se encuentra entre 0.3 μm y 3 μm . Al colocarle un anillo protector desvanecedor solo se mide la radiación difusa.

Figura 6.

Piranómetro



Nota. El piranómetro se utiliza para cuantificar la radiación solar. Obtenido de P. Fernández, (s.f.). Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura. (<https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=3>). Consultado el 18 de septiembre de 2022. De dominio público.

1.2.3. Radiación solar sobre una superficie horizontal

- Región extraterrestre: en la región extraterrestre, la radiación solar (I_0) incidente en un plano horizontal fuera de la atmósfera en W/m^2 , que es equivalente a estar en ausencia de atmósfera, es un componente de I_{ext} a lo largo de la superficie normal a la horizontal y puede obtenerse de la siguiente manera:

$$I_o = I_{ext} \times \cos \cos \theta_Z$$

Ec. 7

$$I_o = I_{sc} [1.0 + 0.033 \cos \cos (\frac{360n}{365})] \cos \cos \theta_Z$$

Ec. 8

Donde:

I_{sc} = es la constante solar (1367 W/m²) y n son la cantidad de días del año

- Región terrestre: en la región terrestre la radiación total es la suma de la radiación difusa y la radiación directa. Se expresa de la siguiente manera:

$$I(t) = I_b + I_d$$

Ec. 9

1.2.4. Radiación solar sobre una superficie inclinada

- Factor de conversión: existen tres factores de conversión, para las radiaciones solares de haz (R_b), difuso (R_d) y reflejado (R_r), que corresponden a los tres tipos de radiación solar que existen (haz, difusa y reflejada en una superficie horizontal y las que le rodean).

Los factores de conversión se utilizan para convertir el haz y las radiaciones solares de una superficie horizontal en las de una superficie inclinada y están definidos de la siguiente forma:

Factor de radiación de haz:

$$R_b = \frac{I'_b}{I_b} = \frac{\cos \cos \theta_i}{\cos \cos \theta_z}$$

Ec. 10

Factor de radiación difusa:

$$R_d = \frac{1 + \cos \cos \beta}{2}$$

Ec. 11

Factor de radiación reflejada, depende de las variaciones de los factores de radiación de haz y radiación difusa, como del ángulo de inclinación (β) que exista.

Para radiación solar total: la relación entre la radiación solar total incidente sobre una superficie inclinada / inclinada (I_T) y la superficie horizontal, $I(t)$, es el factor de conversión de la radiación solar total en superficie inclinada, R' , que se calcula de la siguiente manera:

$$R' = \frac{I_T}{I(t)} = \frac{I_b R_b + I_d R_d}{I_b + I_d} + R_r$$

Ec. 12

1.3. Energía solar fotovoltaica

En los siguientes incisos se describe la energía solar fotovoltaica.

1.3.1. ¿Qué es la energía solar fotovoltaica?

Según Catalán (2014) la energía solar fotovoltaica es aquella que transforma directamente la energía del sol en energía eléctrica. Esta

transformación se realiza a través de celdas compuestas por silicio u otras tecnologías, alcanzando entre un 9 % y un 14 % de la energía del sol.

Esta clase de energía era utilizada únicamente para lugares en donde no existe acceso a la red eléctrica convencional o para usos domésticos, en la actualidad se han desarrollado avances tecnológicos que permiten generar a gran escala. Actualmente la energía solar fotovoltaica instalada en el mundo alcanzó por primera vez medio Tera vatio y se convirtió para ese momento en la primera fuente de energía eléctrica en capacidad desplegada a nivel global, según publicó el Programa de Sistemas de Energía Fotovoltaica de la Agencia Internacional de Energía a través de su Snapshot of Global Photovoltaic Markets.

Lo que muestra que se encuentra en constante crecimiento y desarrollo.

1.3.2. Funcionamiento de tecnología fotovoltaica

Un sistema fotovoltaico es un conjunto de equipos integrados para transformar la energía solar en energía eléctrica de forma eficiente y directa, almacenar la energía eléctrica generada de manera adecuada, suministrar y utilizar la energía producida para consumo y almacenada de forma eficiente.

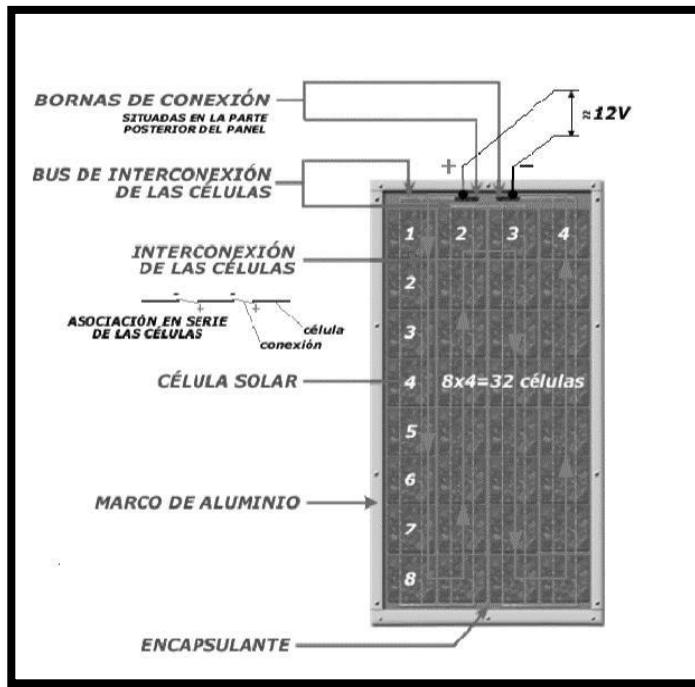
- Módulos fotovoltaicos

Los módulos fotovoltaicos están hechos de un conjunto de células fotovoltaicas, protegidas por un marco de aluminio y una capa de vidrio anodizado, llamados paneles solares.

Estos son los que realizan la transformación directa de la energía solar a la energía eléctrica.

En la figura 7 se describen las partes de un módulo fotovoltaico.

Figura 7.
Módulo Fotovoltaico y sus partes



Nota. El módulo fotovoltaico es un dispositivo que convierte la luz solar en electricidad a través de celdas solares interconectadas. Obtenido de P. Fernández, (s.f.). *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*. (<https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=3>). Consultado el 18 de septiembre de 2022. De dominio público.

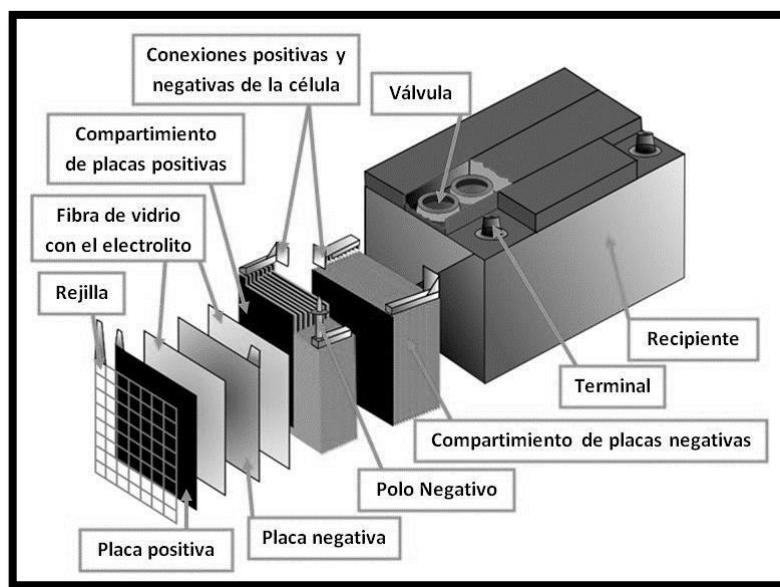
- **Baterías**

Las baterías se usan para almacenar la energía eléctrica generada durante las horas de sol, para que pueda ser utilizada aun cuando no esté brillando el sol, o sea de noche, esté nublado o esté lloviendo. Estas son muy importantes como parte del sistema, debido que realiza la función principal de almacenar energía eléctrica en periodos de abundante radiación o bajo consumo, suministran energía eléctrica estable y adecuada para el uso requerido.

Las baterías usadas en sistemas fotovoltaicos son de ciclo profundo, pueden liberar mucha energía antes de necesitar recargarse, están diseñadas para proveer durante mucho tiempo corrientes eléctricas moderadas. En la figura 8 se observan las partes de una batería.

Figura 8.

Las partes de una batería



Nota. Las baterías de almacenamiento de energía solar capturan y almacenan la energía generada por paneles solares para su uso posterior. Obtenido de Generatuluz. (s.f.). *Tipos de baterías y sus características.* (<https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/tipos-de-baterias-y-sus-caracteristicas/>). Consultado el 22 de septiembre de 2022. De dominio público.

- Regulador de carga

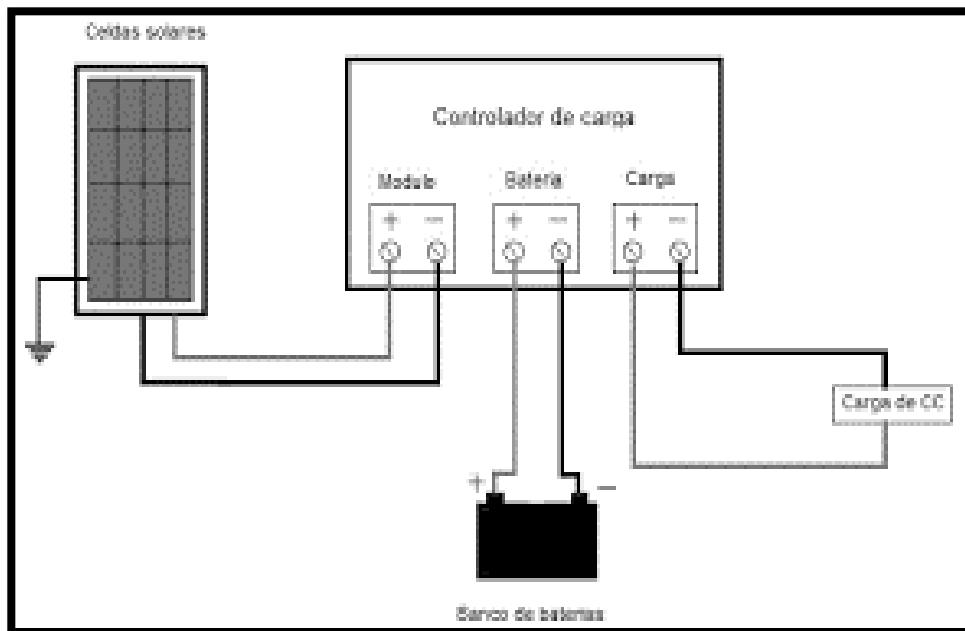
La función principal de este dispositivo es controlar el flujo de corriente de carga que proviene de los paneles hacia la batería y controlar el flujo de corriente

de descarga que va de la batería hacia el inmueble. Esto aplica para los sistemas independientes de la red.

Las características y la instalación de este equipo son de suma importancia para que su desempeño sea óptimo en el sistema fotovoltaico. En la figura 9 se encuentra un diagrama de cómo se conecta con los elementos del sistema.

Figura 9.

Diagrama de la ubicación de un controlador de carga solar



Nota. En el diagrama se muestra la ubicación del controlador de carga solar. Obtenido de Monsolar (s.f.). ¿Qué es y qué hace un regulador de carga solar? (<https://www.monsolar.com/blog/que-es-y-que-hace-un-regulador-de-carga-solar/>). Consultado el 22 de septiembre de 2022. De dominio público.

- Inversor

Este componente del sistema se encarga de transformar la corriente directa de 12V de la batería en corriente alterna de 120V que es lo requerido por la mayoría de los electrodomésticos. En la Figura 10 se muestra la estructura de un inversor.

Figura 10.

Inversor



Nota. El inversor es el encargado de transformar la corriente directa en corriente alterna. Obtenido de Monsolar (s.f.). ¿Qué es y qué hace un regulador de carga solar? (<https://www.monsolar.com/blog/que-es-y-que-hace-un-regulador-de-carga-solar/>). Consultado el 22 de septiembre de 2022. De dominio público.

1.3.3. Aplicaciones de los sistemas fotovoltaicos

Dependiendo de los factores aplicación, cantidad y tipo de energía producida, los sistemas fotovoltaicos son los que se describen a continuación:

- Sistemas individuales corriente directa para aplicaciones domésticas

Esta es la aplicación más conocida en el país, ya que es la instalación de un sistema individual para suministrar energía eléctrica a una vivienda.

Actualmente se cuenta con programas de financiamiento por parte de las empresas dedicadas a la instalación de este tipo de sistemas. Esta es la opción más económica entre los sistemas.

- Sistemas individuales corriente alterna para aplicaciones domésticas

Este es un sistema que se considera como una ampliación de los sistemas individuales de corriente directa.

La diferencia radica en que este sistema no incluye el inversor, tiene mayor capacidad de almacenamiento y la flexibilidad en el uso de aparatos.

- Sistemas aislados para usos productivos

Un sistema aislado se utiliza para cubrir las necesidades que se deseen en el área industrial y/o comercial, estos sistemas se pueden configurar para generar la energía eléctrica que demanden las instalaciones.

Algunos ejemplos del uso de un sistema aislado para usos productivos son:

- Irrigación y cercas eléctricas para ganadería
- Refrigeración de alimentos
- Comunicación
- Iluminación

- Sistemas centralizados aislados de la red

Este sistema es utilizado básicamente en lugares donde las viviendas están centralizadas y pueden realizar la distribución de la energía que el sistema produce, almacena y transforma. Este sistema incluye líneas eléctricas para la distribución de la energía producida. Básicamente tienen la misma estructura que un sistema fotovoltaico individual de corriente alterna, la diferencia es que estos sistemas son capaces de suministrar energía en cantidades y calidades muy altas. Entre las características más sobresalientes de estos sistemas encontramos que cuentan con una mejor calidad en el suministro, menor impacto ambiental, mayor robustez y menor costo de la energía.

- Sistemas centralizados conectados a la red

Los sistemas centralizados conectados a la red son una realidad que se está aplicando gracias a los avances tecnológicos en este tipo de energía renovable. La diferencia con los otros sistemas radica en que no se almacena la energía para luego distribuirla, sino que se provee directamente a la red comercial. Esto significa que no se necesita un banco de baterías, por otra parte, se necesita un equipo especial para adaptar la energía producida por los paneles a la energía de la red. Este tipo de sistemas es una de las tecnologías más prometedoras para la descentralización de la generación de energía limpia.

- Aspectos ambientales

Los efectos ambientales que se consideran al momento de utilizar la tecnología de sistemas de producción de energía solar fotovoltaica se enfocan principalmente en el diseño, ubicación y mantenimiento de su instalación. Los efectos ambientales causados por la producción de energía solar fotovoltaica son

menores que los causados por la generación de energía a través de combustibles fósiles.

Como sugerencia se recomienda:

- Realizar un diseño en la ubicación óptima para que el sistema funcione a la perfección y tomando en cuenta los riesgos y la seguridad necesaria.
- Elaborar un programa para el manejo de desecho de las baterías en caso de utilizarlas.

1.3.4. Análisis financiero

- Valuación de la inversión

La valoración de una inversión es la planificación usada para determinar si una empresa o persona debe realizar una inversión a largo plazo. Este es el plan para la toma de decisiones más importantes sobre el capilar, la inversión y los gastos. Las técnicas para la valuación de inversión son diversas, aplicaremos las siguientes:

- Período de recuperación

El período de recuperación de la inversión (PRI) es un indicador que mide en cuánto tiempo se recuperará el total de la inversión a valor presente. Puede revelarnos con precisión, en años, meses y días, la fecha en la cual será cubierta la inversión inicial.

- Valor presente neto

Es el valor actual de todos los flujos que genera una inversión en el tiempo, tomado en consideración el efecto del tiempo.

- Tasa interna de retorno

También conocida como TIR, es la tasa de distribución de retorno o tasa promedio de retorno. Esta considera el valor del dinero en el tiempo y se proporciona la inversión, mientras que se considera la inversión inicial y el flujo positivo de inversión a lo largo del tiempo.

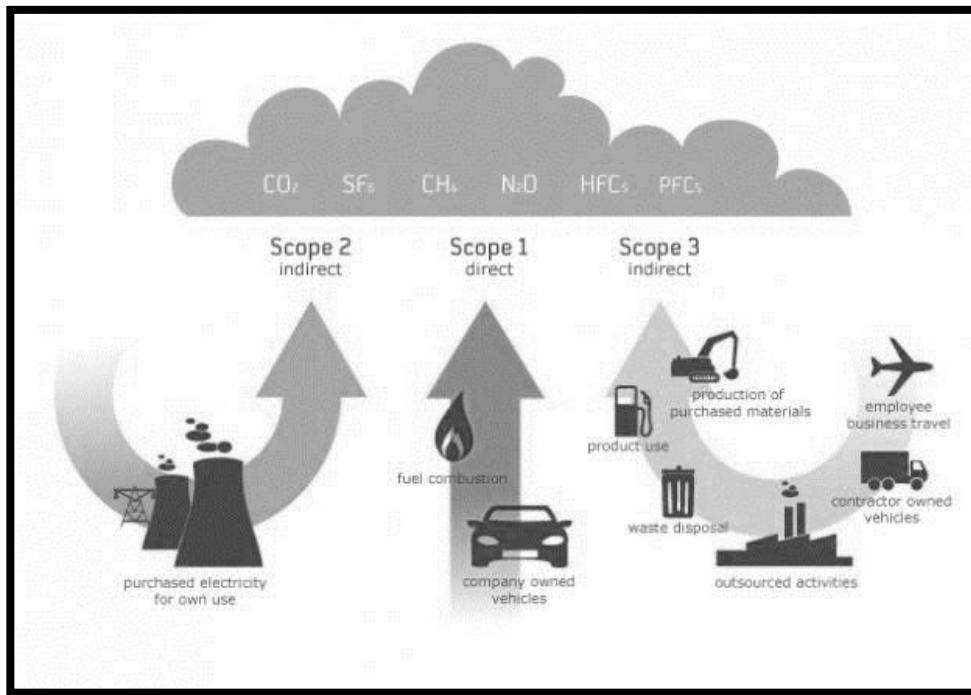
1.3.5. Análisis ambiental

- Huella de carbono

Los gases efecto invernadero son emitidos a la atmósfera y la medida que se toma de ellas es conocida como huella de carbono. Esta permite medir el efecto ambiental que causan las actividades de una persona, una empresa o industria y es uno de los indicadores que nos permite evaluar la sostenibilidad ambiental. En la figura 19 se observan las diferentes fuentes de emisiones y sus alcances.

Figura 11.

Esquema de fuentes de emisión y alcances



Nota. En el esquema se pueden observar las diferentes fuentes de emisiones de gases efecto invernadero. Obtenido de Estévez. (2013). *¿Conoces en qué consiste el GHG Protocol?* (<https://www.ecointeligencia.com/2013/05/ghg-protocol/>). Consultado el 22 de septiembre de 2022. De dominio público.

Según el INCYT (2018):

La huella de carbono para 1 kWh de electricidad de bajo voltaje se estimó en 0.418 kg CO₂-eq por kWh para el año 2016. Esto representa un total de 4,795,534 toneladas de CO₂-eq anuales. La variación climática en el Sistema Nacional Interconectado produce una variación en la huella de

carbono con un rango de 0.310 a 0.500 kilogramos de CO₂-eq. por kWh.
(p. 32.)

En el informe ambiental del Estado de Guatemala, MARN (2016), se identifica que más del 80 % de las emisiones de CO₂ son aportadas por el uso de leña y derivados del petróleo para la generación de energía eléctrica.

- Factores de emisiones de CO₂ por consumo eléctrico

El constante crecimiento económico es claramente uno de los factores que más influye en el incremento de las emisiones de CO₂, así como el crecimiento demográfico, el desarrollo económico, el cambio tecnológico, las estructuras institucionales, los modelos de transportes, las dotaciones de recursos, el estilo de vida y el comercio.

Para medir las emisiones de CO₂ por consumo eléctrico podemos utilizar diversas metodologías, entre ellas:

- Protocolo de gases efecto invernadero
- ISO 14069
- ISO 14064
- Protocolo de gases efecto invernadero (IPCC GHG Workbook)
- Bilan Carbone
- PAS 2050

2. ESTIMACIÓN DEL POTENCIAL SOLAR

Después de describir los conceptos necesarios para la correcta comprensión del trabajo de investigación, se procede al desarrollo del fundamento teórico del proyecto.

El potencial solar es de suma importancia para desarrollar proyectos de energía renovable en el territorio del oriente del país, lo que tendrá un impacto positivo en varios ámbitos para la población en general.

El cual está basado en el manejo de datos de radiación solar, a partir de las cuales se estimará el potencial solar en el área de Chiquimula.

Para poder conocer el potencial solar es necesario contar con una base de datos meteorológicos, los cuales se pueden obtener de diversas fuentes, sin embargo, la mejor información es aquella que se obtiene en el lugar en donde se instalará la planta generadora de energía.

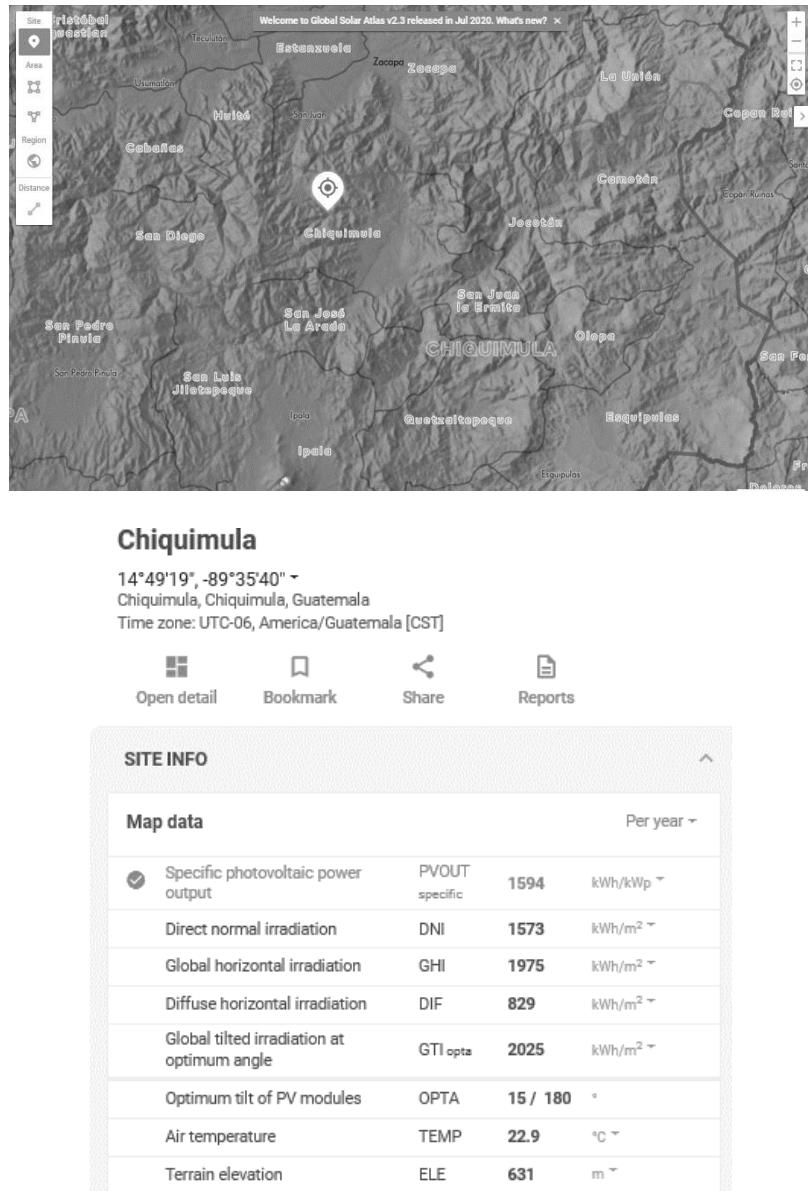
Es por ello que buscamos la estación meteorológica más cercana al área en donde se piensa generar energía solar.

2.1. Estación meteorológica

En el presente proyecto se han tomado los datos cada media hora desde enero del 2012 hasta diciembre del 2020, en la estación meteorológica ubicada en el Centro Universitario de Oriente, CUNORI, localizada en Chiquimula, Chiquimula.

Figura 12.

Mapa con la ubicación de la estación meteorológica



Nota. Se muestra la ubicación de la estación meteorológica que genero la base de datos para la estimación del potencial solar. Obtenido de Estévez. (2013). ¿Conoces en qué consiste el GHG Protocol? (<https://www.ecointeligencia.com/2013/05/ghg-protocol/>). Consultado el 22 de septiembre de 2022. De dominio público.

2.2. Análisis estadístico de datos meteorológicos

Con el banco de datos se elaboró una tabla dinámica en Excel para el cálculo del promedio mensual de la radiación solar en Wh/m² y como resultado se obtuvo la siguiente tabla:

Tabla 1.

Promedio mensual de radiación solar Wh/m²

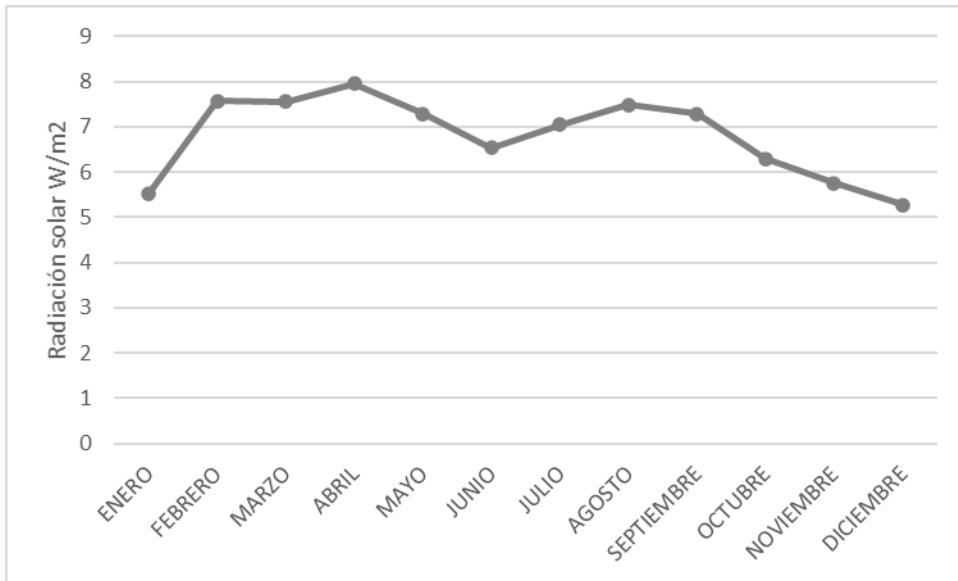
MES	PROMEDIO MENSUAL
ENERO	5.53
FEBRERO	7.57
MARZO	7.55
ABRIL	7.95
MAYO	7.28
JUNIO	6.53
JULIO	7.04
AGOSTO	7.49
SEPTIEMBRE	7.29
OCTUBRE	6.29
NOVIEMBRE	5.76
DICIEMBRE	5.27
PROMEDIO ANUAL	6.79

Nota. La tabla 1 muestra el promedio mensual de radiación solar en Wh/m². Elaboración propia, realizado con Excel.

El siguiente gráfico representa los 108 datos que contiene la serie en estudio y se puede ver el comportamiento de la variable climática, el valor más bajo de radiación solar es de 5.27 Wh/m² en el mes de diciembre y el más alto se ubica en el mes de abril con 7.95 Wh/m².

Figura 13.

Gráfica del promedio mensual de radiación solar en Wh/m²



Nota. El gráfico muestra el comportamiento mensual de la radicación solar durante un año.
Elaboración propia, realizado con Excel.

El siguiente paso fue realizar el análisis de la serie a través del programa MiniTab, con una longitud de 108 datos y 0 datos faltantes. Se aplicaron ocho modelos de series temporales, para identificar el que presente el menor error. Los resultados de cada modelo se encuentran en el apéndice.

En la siguiente tabla se describen el error porcentual absoluto medio (MAPE), desviación absoluta media (MAD) y la desviación cuadrática media (MSD) que se obtuvo al aplicar cada procedimiento:

Tabla 2.*Tabla de resultados para el análisis de los modelos de series temporales*

MODELO/METODO	MAPE	MAD	MSD
Análisis de tendencia con modelo de tendencia lineal	11.939	23.568	769.179
Análisis de tendencia con modelo de tendencia cuadrática	11.938	23.566	676.257
Análisis de tendencia con modelo de curva de crecimiento	11.921	23.762	772.905
Descomposición de series de tiempo con modelo multiplicativo y tendencia más estacional	4.336	8.712	184.617
Descomposición de series de tiempo con modelo multiplicativo estacional solamente	4.354	8.746	184.872
Descomposición de series de tiempo con modelo aditivo con tendencia más estacional	4.34	8.717	184.882
Descomposición de series de tiempo con modelo aditivo estacional solamente	4.361	8.756	185.172
Método de Winters con modelo multiplicativo	5.886	11.419	248.949

Nota. La tabla 2 muestra el resultado del error porcentual absoluto medio, desviación estándar media y la desviación cuadrática media. Elaboración propia, realizado con Excel.

Según la comparación del MAPE el modelo con el 4.33 % de error es el que mejor se ajusta a la serie de datos, este método es el de descomposición de series de tiempo con modelo multiplicativo y tendencia más estacional, con una longitud de 108 y 0 datos faltantes, generó la siguiente ecuación de tendencia ajustada:

$$Y_t = 205.53 + 0.0180t$$

Ec. 13

Y los índices estacionales, siguientes:

Tabla 3.

Índices estacionales

Período	Índice
1	0.83752
2	0.98651
3	1.09908
4	1.14751
5	1.10219
6	0.94719
7	1.07111
8	1.12943
9	1.06403
10	0.96329
11	0.85877
12	0.79337

Nota. La tabla 3 muestra los índices estacionales estimados. Elaboración propia, realizado con Excel.

En la tabla 3 se muestran las medidas de exactitud, que permite obtener un pronóstico con el 95.67 % de significancia.

Tabla 4.

Medidas de exactitud

Indice	Valor
MAPE	4.336
MAD	8.712
MSD	184.617

Nota. La tabla 4 describe los valores de las medidas de exactitud para el modelo seleccionado. Elaboración propia, realizado con Excel.

2.3. Estimación y clasificación de potencial solar

El pronóstico mensual de radiación solar que se obtuvo con el modelo de descomposición de series temporales con modelo multiplicativo y tendencia más estacional se presenta en la siguiente tabla.

Tabla 5.

Pronóstico mensual radiación solar

	ANÓ	PRONÓSTICO kWh/m ²
ENERO		173.78
FEBRERO		204.71
MARZO		228.09
ABRIL		238.16
MAYO		228.77
JUNIO		196.62
JULIO		222.36
AGOSTO		234.49
SEPTIEMBRE		220.93
OCTUBRE		200.03
NOVIEMBRE		178.34
DICIEMBRE		164.77

Nota. La tabla 5 describe el calor del pronóstico mensual de radiación solar. Elaboración propia, realizado con Excel.

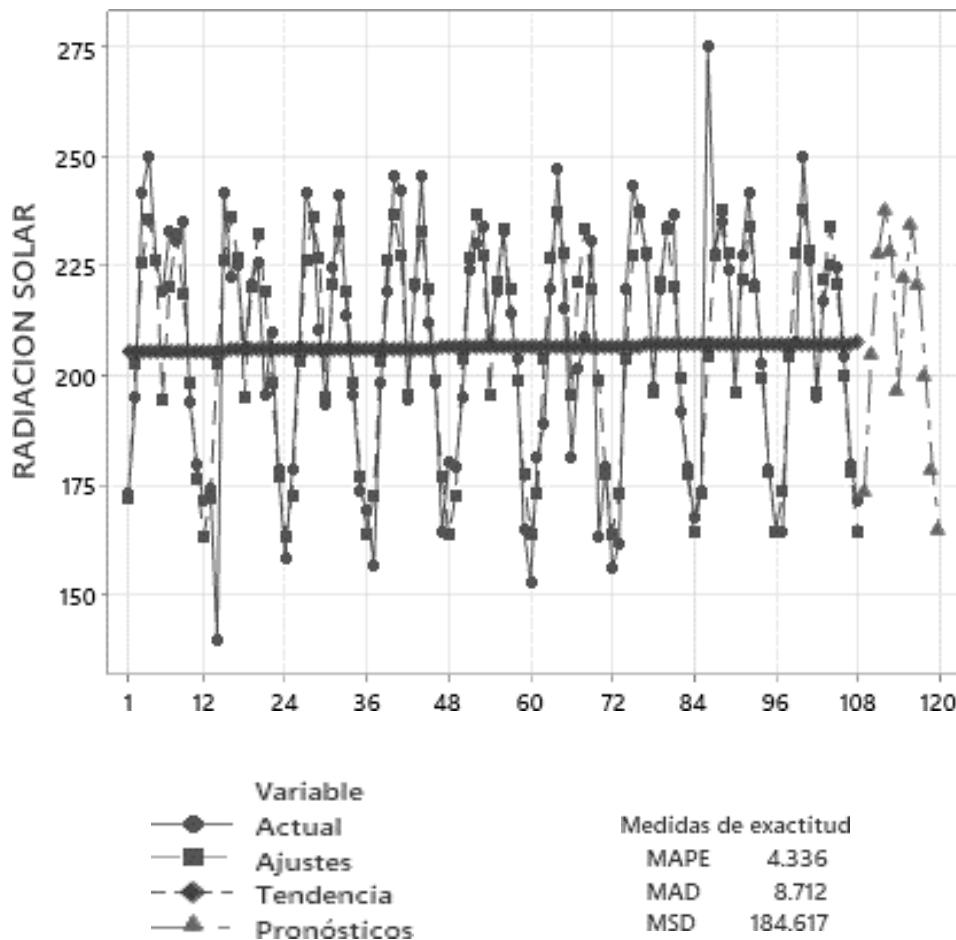
El pronóstico mensual muestra la oportunidad que se tiene para poder generar energía solar en el área que se está evaluando.

El modelo en análisis refleja que los datos que están por encima de 235 y por debajo de 165 son similares a los de todos los años anteriores.

Diría que el pronóstico es muy similar al año 2018 y 2017, sin embargo, se requieren estudios más profundos para pronosticar datos extremos.

Figura 14.

Descomposición de series de tiempo de radiación solar (W/m^2). Multiplicativo



Nota. El gráfico de la descomposición de series de tiempo de radiación solar con modelo multiplicativo, permite comparar el comportamiento de las medidas reales, valores ajustados, tendencia y el pronóstico. Elaboración propia, realizado con Excel.

Como resultado del análisis de descomposición de series de tiempo de radiación solar para el municipio de Chiquimula se determina el pronóstico de la radiación solar, con un error del 4.33 % en la siguiente tabla:

Tabla 6.

Pronóstico del promedio mensual radiación solar Wh/m²

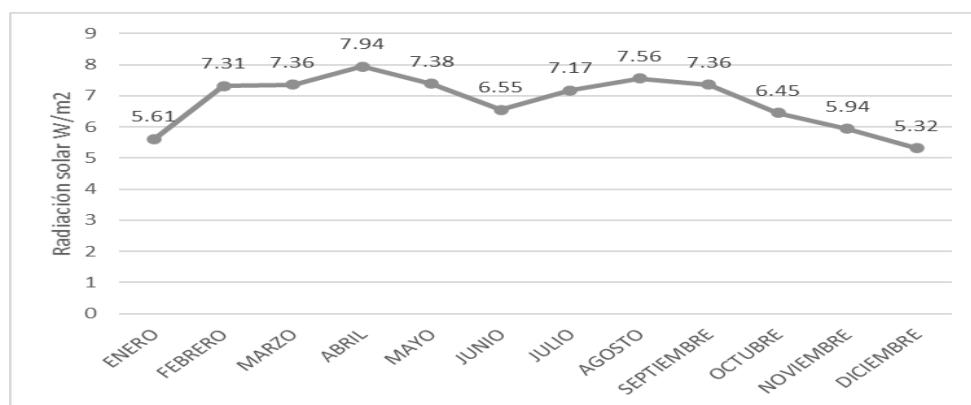
MES	Radiación solar Wh/m ²
Enero	5.61
Febrero	7.31
Marzo	7.36
Abril	7.94
Mayo	7.38
Junio	6.55
Julio	7.17
Agosto	7.56
Septiembre	7.36
Octubre	6.45
Noviembre	5.94
Diciembre	5.32

Nota. Pronóstico del promedio mensual, radiación solar. Elaboración propia, realizado con Excel.

El siguiente gráfico muestra el comportamiento de la radiación solar a lo largo del año.

Figura 15.

Gráfico del pronóstico de radiación solar promedio



Nota. El gráfico muestra el comportamiento de la radiación solar promedio mensual. Elaboración propia, realizado con Excel.

2.3.1. Clasificación del potencial solar mensual

De acuerdo con el nuevo modelo de estadísticas energéticas en Guatemala el potencial solar se puede clasificar en pobre, marginal, moderada, buena y excelente. La siguiente tabla muestra la clasificación del potencial solar según el mes.

Tabla 7.

Clasificación de la radiación solar

MESES	RADIACIÓN SOLAR W/m ²	CLASIFICACIÓN
ENERO	5.61	BUENA
FEBRERO	7.31	EXCELENTE
MARZO	7.36	EXCELENTE
ABRIL	7.94	EXCELENTE
MAYO	7.38	EXCELENTE
JUNIO	6.55	BUENA
JULIO	7.17	EXCELENTE
AGOSTO	7.56	EXCELENTE
SEPTIEMBRE	7.36	EXCELENTE
OCTUBRE	6.45	BUENA
NOVIEMBRE	5.94	BUENA
DICIEMBRE	5.32	BUENA

Nota. Tabla 7 muestra la descripción de la clasificación del promedio mensual de radiación solar, Elaboración propia, realizado con Excel.

Con la demanda de energía existente en el municipio de Chiquimula, se realizará el cálculo para determinar la tecnología para la generación de energía solar fotovoltaica en dicho municipio.

3. DISEÑO DE PLANTA SOLAR FOTOVOLTAICA

Actualmente las energías renovables en Guatemala tienen un 75 % de participación dentro de la matriz energética, de ese porcentaje el 1.4 % corresponde al aprovechamiento de energía solar. Esto muestra la oportunidad que tenemos para aprovechar esta fuente de energía.

Conociendo brevemente el contexto actual y que según los datos publicados por el AMM la demanda media para el municipio es de 10 MW de potencia, realizaremos un análisis para el diseño de una planta solar.

3.1. Análisis para el diseño de una planta solar fotovoltaica

Para el diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 MW en el municipio de Chiquimula se seleccionó el equipo y el terreno. Se estimaron los ingresos y egresos, con base en otros estudios realizados.

3.1.1. Localización de terreno

Para la selección del terreno se tomó en consideración la cercanía al perímetro de la subestación, el fácil acceso a la ciudad y la baja densidad poblacional en los alrededores de este.

Se seleccionó un terreno de 10 hectáreas ubicado a tres kilómetros de la ciudad, con acceso a la CA10 por la pista de aterrizaje a la altura del km 165 y por la zona 7 de Chiquimula.

Figura 16.

Ubicación de terreno para planta fotovoltaica



Nota. Se muestra la ubicación del terreno para planta fotovoltaica. Elaboración propia, realizado con Google Earth 2022.

Este terreno cumple con los requisitos básicos para la instalación de una planta solar:

- Se ubica en el perímetro de una subestación
- Cuenta con dos accesos, uno es terracería y el otro es la CA10
- Es un terreno llano
- Hay baja densidad de población
- Está a 3 km de la ciudad

3.1.2. Equipo

Los paneles fotovoltaicos seleccionados son LG NeON 2 LG335N1CA5, este panel solar utiliza la tecnología específica para incrementar la potencia de salida y fiabilidad, sus características principales son:

Tabla 8.*Características principales de panel fotovoltaico LG335N1CA5*

CARACTERISTICA	VALOR
Número de modelo	LG335N1C-A5
Potencia condiciones (STC)	335 vatios
Potencia condiciones (PTC)	311.1 Vatios
Voltaje circuito abierto	41.0 Voltios
Corriente de cortocircuito	10.49 Amperios
Altura	39.88 mm
Longitud	1.686 mm
Ancho	1.016 mm
Peso	16.78 kg
Área	1.71 m ²
Eficiencia del módulo	19.6 %
Tolerancia de potencia	0/+3 %
Color	Negro

Nota. En la tabla 8 se describen las características del panel fotovoltaico *LG335N1CA5*. Elaboración propia, realizado con Excel.

Este módulo permite reducir la pérdida de potencia de salida y las células contienen una mínima proporción de boro y oxígeno en las células semiconductoras, eliminando lo que se conoce como degradación lumínica inducida. Utiliza 60 células y permite mayor eficiencia espacial y configuraciones óptimas.

El mayor beneficio de este panel es que provee una eficiencia de 19.6 %, se degradada anualmente -0.6 % lo que muestra una buena durabilidad y 25 años de garantía. Cuenta con las licencias *ISO 9001*, *Module Fire Performance (USA) Type 1*, *IEC 61215*, *IEC 61701 (Test de corrosión de niebla salina)*, *IEC 62716 (Test de corrosión de amoniaco)*, *IEC 61730-1/-2UL*. Su precio está en 478 USD.

Figura 17.

Panel fotovoltaico



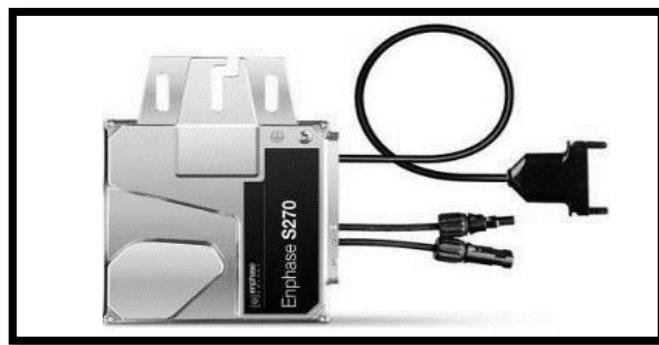
Nota. La imagen muestra el panel fotovoltaico de la marca LG. Obtenido de Svarc. (2021). *LG Solar Panels Review.* (<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/lg-solar-panel-review>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Los inversores seleccionados son los microinversores de la empresa Enphase, porque permiten la operación independiente de cada panel y una mayor salida de potencia (hasta un 20 %).

Es uno de los más seguros y a un precio de 169 USD, considerándose adecuado a su funcionalidad. El modelo para utilizar es el IQ7 avalado para ser usado con paneles que tengan una salida de 235-350 W.

Figura 18.

Modelo de microinversor



Nota. El modelo de microinversor para asegurar la independencia de los paneles solares. Obtenido de C. Jiménez. (2018). *Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana.* (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Este modelo está listo para ser usado en redes inteligentes, logrando obtener la mejor eficiencia y basados en la plataforma de 7ma. generación IQ. Su carcasa de polímero y de fácil instalación.

Tabla 9.

Especificaciones de microinversor Enphase modelo IQ 7

CARACTERISTICA	VALOR
Potencia tolerada	60 y 70 celdas
Potencia máxima de salida	250 VA
Potencia que recibe	235-350+ W
Eficiencia CEC	97 %

Nota. La tabla 9 muestra las especificaciones del microinversor Enphase. Elaboración propia, realizado con Excel.

El Regulador de carga seleccionado es de la marca MPPT permite proteger las baterías de una sobrecarga o de una descarga total en el proceso de generación o bien de consumo de la energía almacenada. Sus características más destacadas son:

- Detectan rápidamente el punto máximo de potencia, ante las variabilidades climáticas y los cambios en la intensidad de luz, haciendo más eficiente la recolección de energía en 30 % como máximo.
- Puede convertir con hasta una eficiencia de 98 %.
- Cuenta con una protección electrónica integral.
- Tiene un sensor de temperatura interna, con el que compensa la tensión de carga acorde a la temperatura.

Figura 19.

Regulador de voltaje VICTRON modelo MMPT Smart Solar 250V 100A



Nota. El regulador de voltaje brinda protección a las baterías. Obtenido de Victron Energy. (2023).

Pricelist 2023 Q2 EX VAT C Euro.
[\(https://www.victronenergy.com.es/media/pricelist/Pricelist_Victron-EURO_2023-Q2_Web.pdf\).](https://www.victronenergy.com.es/media/pricelist/Pricelist_Victron-EURO_2023-Q2_Web.pdf)

Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

El modelo seleccionado es MMPT Smart Solar (250V 100A) marca VICTRON a 905 USD de precio.

Tomando en cuenta que, para reducir el gasto en baterías, este sistema será utilizado solamente como sistema auxiliar para poder cubrir la demanda requerida en momentos en que las placas solares no funcionen por situaciones climáticas.

Figura 20.

Batería Solar-One HUP SO-6-85-23 48V Flooded Battery.



Nota. La batería se utiliza para almacenar la energía producida por los paneles. Obtenido de C. Jiménez. (2018). *Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana.* (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Las baterías seleccionadas son los modelos Solar-One HUP (SO-6-85-23 48V Flooded Battery). Estas están constituidas por ácido y plomo, con capacidad de 1,160 Amperios-hora, tensión de 48V, vida útil bastante alta y a 12680 USD

de precio. El total de baterías requeridas es de 85, cubriendo entre un 10 % - 20 % la capacidad instalada de la planta.

Para elevar el voltaje en el sistema auxiliar se utilizará el inversor Phoenix 48/5000, de la marca VICTRON (48V-230V). El precio de este inversor es de 1804 USD.

Figura 21.

Inversor Phoenix 48/5000VA.



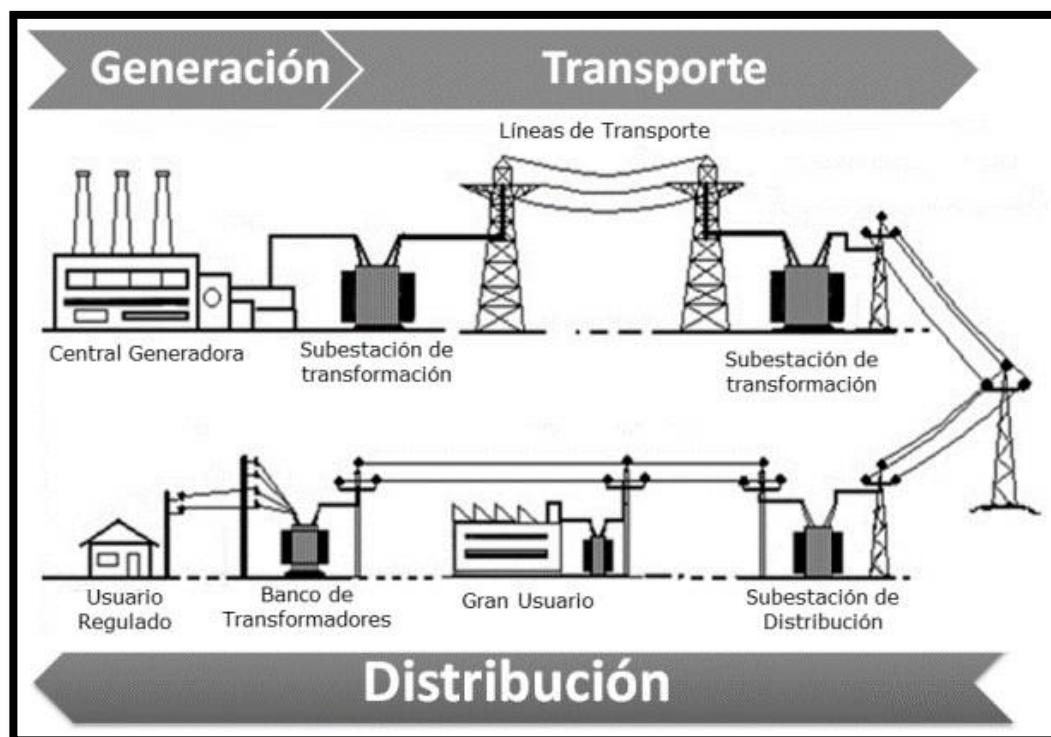
Nota. El inversor Phoenix. Obtenido de Victron Energy. (2023). *Pricelist 2023 Q2 EX VAT C Euro.* (https://www.victronenergy.com.es/media/pricelist/Pricelist_Victron-EURO_2023-Q2_Web.pdf). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Su descripción básica: eficacia 95 %, autoconsumo 35W, trabaja a una temperatura desde -40 °, múltiples protecciones y un ciclo de vida de 10-15 años.

Las instalaciones de generación de energía solar utilizan sistemas de transmisión entre 12-115kV, que después son elevados a través de subestaciones para alcanzar un máximo de 400 kV de voltaje de alta tensión, utilizada para trasladar electricidad a largas distancias.

Figura 22.

Sistema de distribución de una red eléctrica



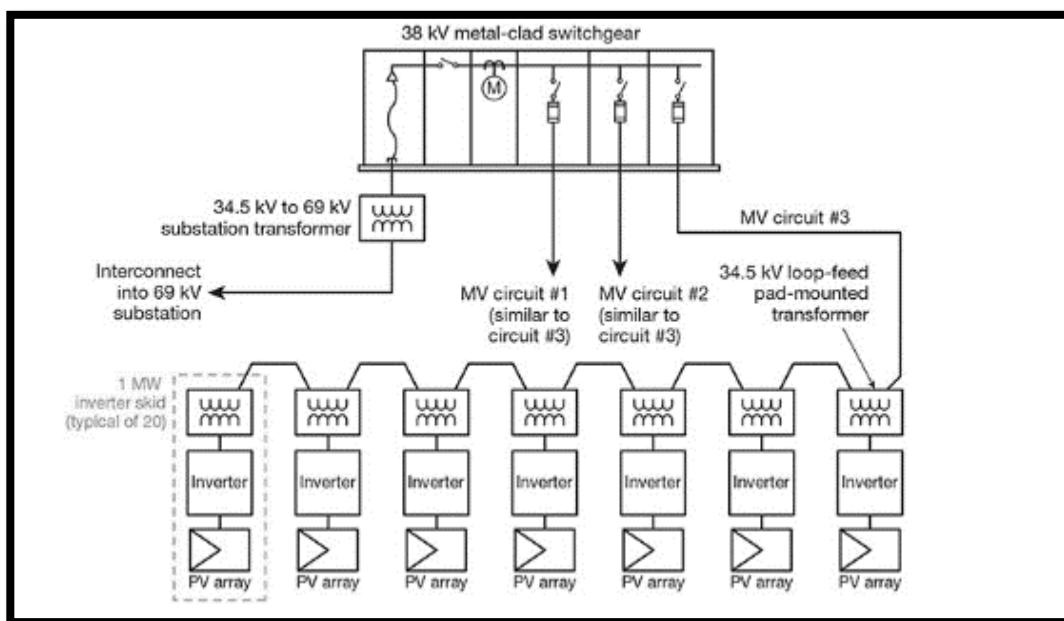
Nota. En la figura 22 se muestra la secuencia de los pasos para la distribución de la energía eléctrica a través de la red eléctrica. Obtenido de MEM. (2017). *Subsector eléctrico en Guatemala*. (p. 3.). Ministerio de Energía y Minas.

Se utilizará un transformador de distribución para cada 0.5 MW, basados en los estándares IEEE que determinan los requisitos mínimos en pérdidas de carga, pérdidas totales, el porcentaje de la impedancia a la corriente nominal y el

incremento de la temperatura en los sistemas fotovoltaicos de generación, una producción normal debe tener un transformador de distribución por cada MW instalado.

Figura 23.

Esquema de transformadores de MW



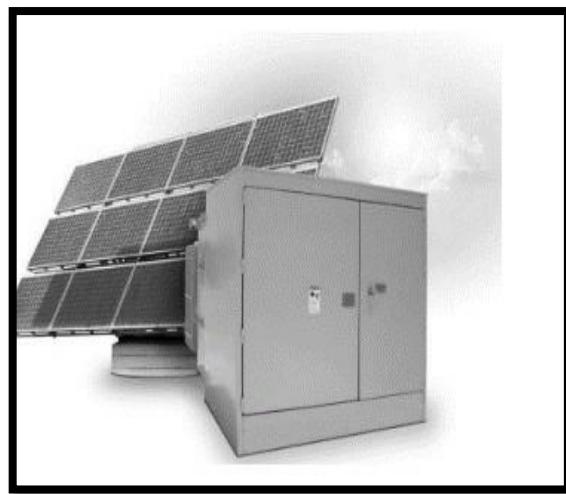
Nota. La figura 23 muestra transformadores de distribución elevadores hasta 34 kV por cada 1 MW instalado en una planta de capacidad total de 20 MW. Obtenido de C. Jiménez. (2018). *Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana.* (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Cada rama en serie tiene 750 paneles (paralelo), entonces cada transformador elevará la tensión de 4 ramas (serie) para obtener: tensión (460 V) e intensidad (862.5 A).

La potencia resultante es de 396.75 kVA, tomando en cuenta las ampliaciones que pudieran requerir un incremento de potencia se eligió un modelo de 500 kVA. Este modelo brinda mayor libertad y flexibilidad. El transformador seleccionado es el modelo PROLEC GE, diseñado para aplicaciones solares con diferentes rangos de operación.

Figura 24.

Transformador de distribución del modelo PROLEC GE



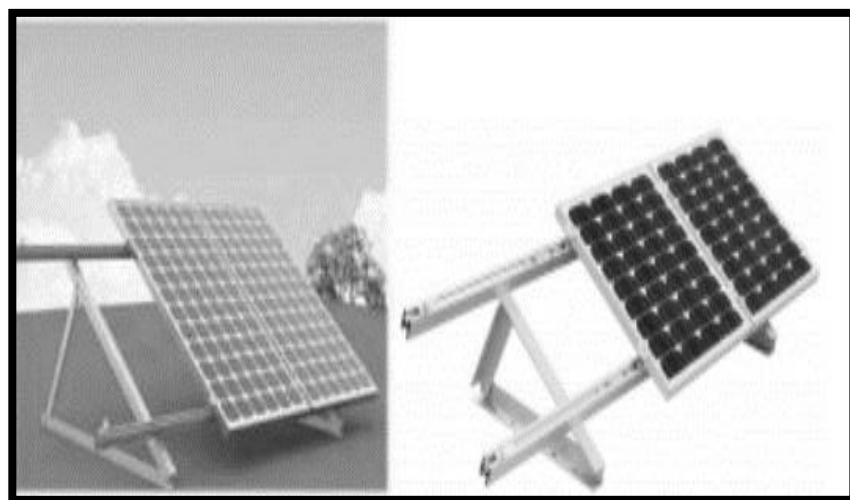
Nota. La figura 24 muestra un transformador de distribución. Obtenido de C. Jiménez. (2018). *Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana*. (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Su garantía es de 25 años, este modelo permite que el voltaje entrante se adapte en un rango de 208-600 V, una tensión de salida regulable de 30-60 kV, puede trabajar a 50-60 Hz, con una impedancia de 5.75 %-7.5 % y el precio es de 5619 USD.

Las monturas solares que necesitan los paneles fotovoltaicos son triangulares, permiten inclinar los paneles para obtener una mayor irradiación, están construidas en aluminio y son capaces de resistir velocidades del viento de hasta 60 m/s, soportan grandes cargas de polvo.

Figura 25.

Sistema de montura triangular flexible



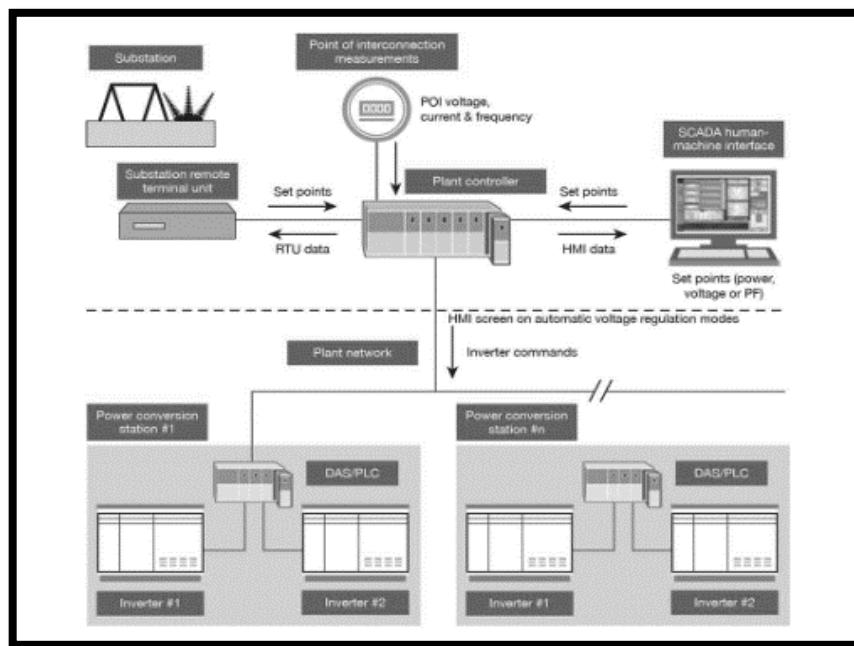
Nota. La figura 25 muestra la estructura de un sistema de montura triangular flexible. Obtenido de C. Jiménez. (2018). Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana. (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

Los sistemas de monturas para 8 paneles (ancho de 1.016 mm y profundidad de 40 mm, una capacidad de ajuste de hasta 60 °) están valorados en 692 USD. Y para 10 paneles se cotizaron en 802 USD.

Para observar y controlar todo el equipo instalado se usarán programas con SCADA. Permitiendo obtener información en tiempo real de las instalaciones (inversores, seguidores y estaciones meteorológicas).

Figura 26.

Componentes del modelo SCADA en la producción de energía solar



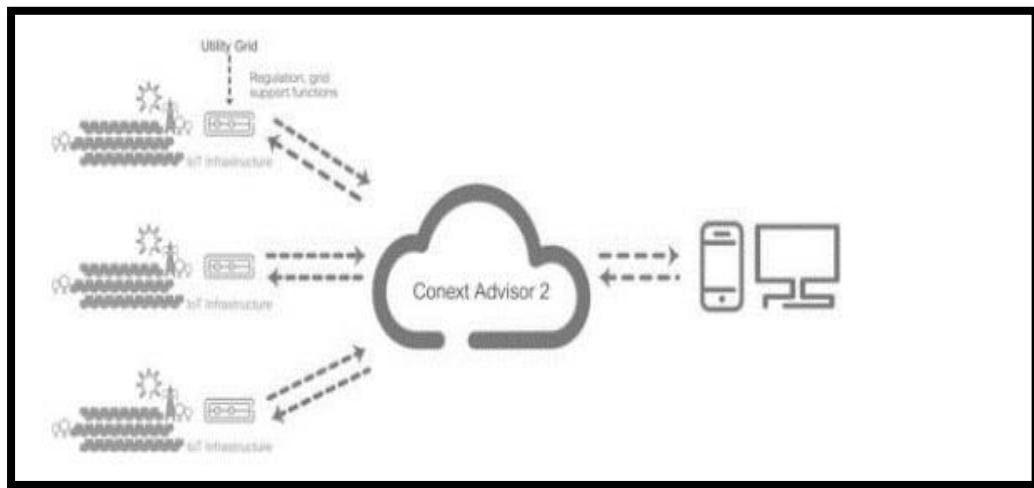
Nota. La figura 26 muestra los componentes del modelo Scada. Obtenido de C. Jiménez. (2018). *Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana*. (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

El software Conext Advisor 2 (Schneider Electric) es utilizado para monitorear y dirigir plantas solares fotovoltaicas a través de computadoras y otros dispositivos digitales, proporcionando un análisis en tiempo real e información meteorológica de forma segura.

Además, permite controlar la energía que produce la planta solar como si fuera un contador y las condiciones en las que están trabajando los inversores, paneles y el sistema de baterías.

Figura 27.

Esquema de distribución de información en el programa Conext Advisor 2



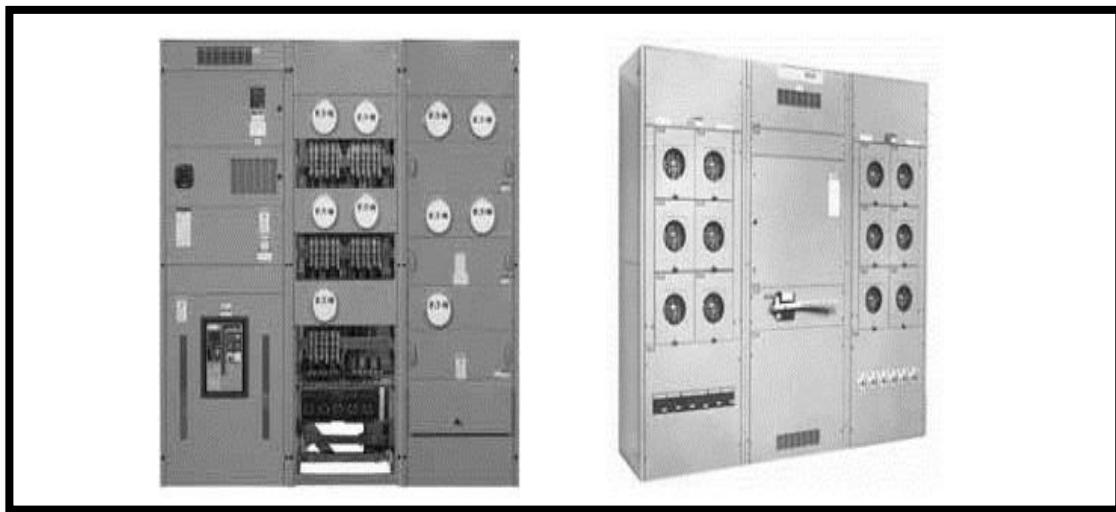
Nota. La figura 27 muestra el esquema de distribución de información en el programa. Obtenido de C. Jiménez. (2018). *Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana.* (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

El panel de interruptores seleccionado es el kit completo Group-Mounted Switchboard, que permite hasta 240 V de corriente monofásica e intensidades entre 400-4000 Amperios.

Cada rama de 750 paneles (tensión de 230 V e intensidad de 862.5 A) necesita un panel de interruptores con el valor de 7107 USD y una vida útil de 25 años.

Figura 28.

Panel de interruptores de CA Eaton Group-Mounted Switchboard



Nota. La figura 28 muestra como es un panel de interruptores. Obtenido de C. Jiménez. (2018). *Estudio del diseño de una planta solar fotovoltaica de 10 megavatios en Gaborone, Botsuana.* (<https://es.scribd.com/document/435040709/TFG-CARLOS-JIMENEZ-PRIETO-pdf>). Consultado el 12 de agosto de 2022. De dominio público.

El cableado necesario para las instalaciones fotovoltaicas se deduce a través de los siguientes criterios:

- La intensidad máxima admisible o de calentamiento ($70^{\circ} - 90^{\circ}$).
- La caída de tensión, el rango está del 5 % al 7 % según las Normas técnicas del servicio de distribución -NTSD.
- La intensidad de cortocircuito ($160^{\circ}-250^{\circ}$ dependiendo del cable).

Para la selección de los cables se usó el primer criterio, la intensidad máxima admisible.

Figura 29.

Catálogo de empresa RCT con sección de cables según aislante

Sección	Instalación directamente enterrada				Instalación al aire en galerías ventiladas			
	Terna de cables unipolares (1)		Un cable tripolar o tetrapolar (2)		Terna de cables unipolares (1)		Un cable tripolar o tetrapolar (2)	
	XLPE	PVC	XLPE	PVC	XLPE	PVC	XLPE	PVC
6	72	63	66	56	46	38	44	36
10	96	85	88	75	64	53	61	50
16	125	110	115	97	86	71	82	65
25	160	140	150	125	120	96	110	87
35	190	170	180	150	145	115	135	105
50	230	200	215	180	180	145	165	130
70	280	245	260	220	230	185	210	165
95	335	290	310	265	285	235	260	205
120	380	335	355	305	335	275	300	240
150	425	370	400	340	385	315	350	275
185	480	420	450	385	450	365	400	315
240	550	485	520	445	535	435	475	370
300	620	550	590	505	615	500	545	425
400	705	615	665	570	720	585	645	495
500	790	685			825	665		
630	885	770			950	765		

Nota. La figura 29 muestra una tabla del catálogo de la empresa RCT, con una sección de cables aislantes. Obtenido de Cables RCT. (2019). *Intensidad admisible de los conductores eléctricos de baja tensión.* (p. 2.). Cables RCT.

Se seleccionaron los modelos y la longitud necesaria de cada uno, estos cuentan con una garantía de 50 años.

Tabla 10.

Características de cables a utilizar

MODELO	LONGITUD (metros)	PRECIO (USD)
PVC unipolar sección 6 mm ²	6,000	89
XLPE unipolar 120 mm ²	250	1,982
XLPE unipolar 630 mm ²	100	9,676
PVC unipolar 16 mm ²	16	249
XLPE 300 mm ²	8	4,720

Nota. La tabla 10 muestra las características del cable que se necesita. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.1.3. Estimación del número de paneles

Para la instalación tomaremos 1,000 m² para edificios y maquinaria sin contar los paneles, esto nos deja 99,000 m² para colocar los paneles. Lo requerido por cada panel es de 1.71 m² a esto se le debe sumar 10 % según criterio utilizado para dimensionar otras distribuciones, calculando que cada panel estaría utilizado 2 m².

$$\text{cantidad de paneles} = \frac{99000 \text{ m}^2}{2\text{m}^2} = 49500 \text{ paneles}$$

Ec. 14

Según los cálculos realizados se estima que podrían instalarse hasta 49,500 paneles.

3.1.4. Estimación de producción

Para establecer la cantidad de energía eléctrica generada por un sistema panel solar se usará la siguiente fórmula:

$$E = A \times r \times H \times PR$$

Ec. 15

Donde:

E = potencia (kW al día)

A = Área del panel (m²)

r = Eficiencia (%) del panel

H = promedio anual de radiación solar (kW/m² al día)

PR = coeficiente de rendimiento (tomando un valor de 0.92)

$$E = 1.71 m^2 \times 0.196 \% \times 6.83 \frac{kW}{m^2} \times 0.92 \%$$

$$E = 2.10 kW$$

La producción de potencia de cada panel a través del pronóstico del promedio de radiación solar es de 2.10 kW al día, por consiguiente, con 30,000 paneles se podría producir un mínimo de 63,000 MW al día. La estimación mensual de energía por panel según el pronóstico de la serie de tiempo es el siguiente:

Tabla 11.

Estimación de la producción de energía de un panel solar

VARIABLE	Enero	Febrero	Marzo	Abril	Mayo	Junio
Área (m ²)	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71
Eficiencia (19.6%)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Radiación (pronostico)	5.61	7.31	7.36	7.94	7.38	6.55
PR (perdidas promedio)	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Potencia (kW)	1.73	2.25	2.27	2.45	2.28	2.02
Energía mensual (kWh)	53.62	63.11	70.35	73.45	70.54	60.59

Continuación de la tabla 11.

VARIABLE	Julio	Agosto	Septiembre	Octubre	Noviembre	Diciembre
Área (m²)	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71	1.71
Eficiencia (19.6%)	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20	0.20
Radiación (pronostico)	7.17	7.56	7.36	6.45	5.94	5.32
PR (perdidas promedio)	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92	0.92
Potencia (kW)	2.21	2.33	2.27	1.99	1.83	1.64
Energía mensual (kWh)	68.54	72.26	68.08	61.65	54.95	50.85

Nota. La tabla 11 muestra el resultado mensual de un panel fotovoltaico, tomando en cuenta la potencia, la radiación, la eficiencia, el área, las perdidas promedio. Elaboración propia, realizado con Excel.

Se debe considerar que estos datos son calculados teóricamente, por lo que es necesario evaluar con más detalle otros factores.

En síntesis, para la instalación de una planta fotovoltaica de 10 MW de potencia instalada es preciso contar con lo siguiente:

Tabla 12.

Resumen del equipo requerido

DESCRIPCION	MODELO SELECCIONADO	CANTIDAD REQUERIDA
Paneles solares fotovoltaicos	LG NeON 2 LG335N1C-A5 335 W	30000 unidades
Microinversores	Enphase S270	30000 unidades
Cableado de PVC unipolar	sección 6 mm ²	6000 metros
Cableado de XLPE unipolar	sección 120 mm ²	250 metros
Cableado de XLPE unipolar	sección 630 mm ²	100 metros
Cableado de PVC unipolar	sección 16 mm ²	16 metros
Cableado de XLPE	sección 300 mm ²	8 metros
Transformadores de distribución	PROLEC GE	21 unidades
Reguladores de carga	MPPT Smart Solar 250V 100A VICTRON	160 unidades
Baterías Solar	ONE HUP SO-6-85-23 48v Flooded Battery	85 unidades

Continuación de la tabla 12.

DESCRIPCION	MODELO SELECCIONADO	CANTIDAD REQUERIDA
Inversores para las baterías	VICTRON Phoenix 48/5000	85 unidades
Monturas de 10 paneles	SolarPV4U	3000 unidades
Monturas de 8 Panels	SolarPV4U	320 unidades
Paneles de interruptores	Eaton Group-Mounted Switchboard	42 unidades

Nota. La tabla 12 muestra el resumen de los componentes de una planta solar. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2. Estimación de inversión inicial, costos e ingresos

Para conocer la viabilidad económica del proyecto se realizará un análisis financiero que permita estimar el periodo de retorno, valor presente neto y tasa interna de retorno, tomando en consideración los costos y beneficios económicos, así como la estimación de la demanda.

3.2.1. Inversión inicial

La inversión inicial tomará en consideración la adquisición del equipo, el terreno, asesores y expertos para llevar a cabo los estudios, gestiones y trámites para la construcción de las instalaciones y su puesta en marcha.

3.2.1.1. Equipo

Se estableció el costo de la compra de todo el equipo seleccionado para la instalación de la planta solar. No se incluye el valor del software de monitorización ya que no hay información disponible en relación con su precio.

Tabla 13.*Descripción del costo del equipo seleccionado*

Descripción	Cantidad requerida	Precio (USD)	Precio total (USD)
Paneles solares fotovoltaicos	30000 unidades	\$ 478	\$ 14,337,750
Microinversores	30000 unidades	\$ 169	\$ 5,064,480
Cableado de PVC unipolar	6000 metros	\$ 90	\$ 537,600
Cableado de XLPE unipolar	250 metros	\$ 1,982	\$ 495,600
Cableado de XLPE unipolar	100 metros	\$ 9,676	\$ 967,600
Cableado de PVC unipolar	16 metros	\$ 250	\$ 3,994
Cableado de XLPE	8 metros	\$ 4,720	\$ 37,760
Transformadores de distribución	21 unidades	\$ 5,620	\$ 118,012
Reguladores de carga	160 unidades	\$ 906	\$ 144,896
Baterías Solar	85 unidades	\$ 12,680	\$ 1,077,800
Inversores para las baterías	85 unidades	\$ 1,804	\$ 153,340
Monturas de 10 paneles	3000 unidades	\$ 802	\$ 2,406,240
Monturas de 8 panels	320 unidades	\$ 692	\$ 221,466
Paneles de interruptores	42 unidades	\$ 7,107	\$ 298,502
TOTAL			\$ 25,865,039

Nota. La tabla 13 muestra el consolidado de los gastos para la ejecución del proyecto.

Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.1.2. Terreno

El precio total del terreno de 10 hectáreas es de 100,000 USD, estableciendo un valor por hectárea de 10,000 USD.

3.2.1.3. Construcción

Basándonos en información relacionada a la construcción de otras plantas solares se estimó que el período de construcción será de 1 año. La cantidad de trabajadores será de 94 en la fase de construcción e instalación. Para definir los salarios anuales brutos se realizó una comparación de la diferencia del salario

medio anual en Guatemala es de 4,346.00 USD y el salario medio anual en EE. UU. que es de 15,080.00 USD.

Tabla 14.

Salarios para la construcción de la planta

Empleo	Numero	Salario bruto anual medio en USA (USD)	Salario bruto medio en Guatemala (USD)
Jefe de proyecto	1	\$ 134,910	\$ 134,910
Jefe de construcción	1	\$ 83,170	\$ 83,170
Ingeniero civil	4	\$ 74,620	\$ 74,620
Ingeniero técnico	6	\$ 43,240	\$ 43,240
Trabajador del acero	6	\$ 44,890	\$ 11,223
Soldador	7	\$ 45,990	\$ 11,498
Operario	35	\$ 29,600	\$ 7,400
Operario de cableado	20	\$ 39,150	\$ 9,788
Operario de transmisión	7	\$ 39,110	\$ 9,778
TOTAL		\$	385,625

Nota. La tabla 14 muestra los salarios para las personas que trabajarán en la planta fotovoltaica. Elaboración propia, realizado con Excel.

Es necesario contar con asesoría de expertos para mitigar los impactos negativos que pudieran presentarse a través de la evaluación de impacto ambiental, estos costos son calculados para un año y se obtuvieron de PayScale y se muestran en la siguiente tabla, según la comparación de salario bruto medio en Guatemala.

Tabla 15.

Costo en asesoría y expertos

Empleo	Salario bruto anual medio en USA (USD)	Salario bruto medio en Guatemala (USD)
Asistencia legal	\$ 81,130	\$ 20,283
Agente social	\$ 79,501	\$ 19,875
Experto medioambiental	\$ 61,700	\$ 15,425
Meteorólogo	\$ 51,650	\$ 12,913

Continuación de la tabla 15.

Empleo	Salario bruto anual medio en USA (USD)	Salario bruto medio en Guatemala (USD)
Asesor tecnología fotovoltaica	\$ 73,761	\$ 18,440
Experto en seguridad laboral	\$ 59,000	\$ 14,750
Asesoría económica	\$ 73,048	\$ 18,262
TOTAL		\$ 119,948

Nota. La tabla 15 muestra los costos en asesoría y expertos. Elaboración propia, realizado con Excel.

La inversión inicial para instalar una planta solar al primer año de operación se muestra en la tabla resumen.

Tabla 16.

Resumen inversión inicial

INVERSIÓN INICIAL	MONTO (USD)
Equipo	\$ 25,865,039
Terreno	\$ 100,000
MO Construcción e Instalación	\$ 385,625
Asesoría y expertos	\$ 119,948
TOTAL	\$ 26,470,612

Nota. La tabla 16 muestra la inversión inicial. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.2.2. Costos fijos

Para identificar los costos fijos que tendrá el proyecto en operación, se compararán los sueldos correspondientes a la ocupación, según los datos obtenidos en BLS (U.S. BUREAU LABOR OF STATISTICS, 2021). También se tomará en cuenta que existirán dos turnos de siete horas durante los siete días de la semana.

Tabla 17.

Descripción de montos salariales anuales para empleados de la planta

Empleo	Numero	Salario bruto anual medio en USA (USD)	Salario bruto medio en Guatemala (USD)
Ingeniero eléctrico/industrial	2	\$ 92,070	\$ 23,018
Ingeniero informático	2	\$ 51,060	\$ 12,765
Directivo	1	\$ 154,910	\$ 38,728
Electricistas	4	\$ 59,020	\$ 14,755
Operadores	6	\$ 57,230	\$ 14,308
Encargados de mantenimiento	2	\$ 66,230	\$ 16,558
Total empleados	17	Total (USD)	\$ 120,130

Nota. La tabla 17 describe los montos salariales anuales. Elaboración propia, realizado con Excel.

3.3. Proyección de ingresos

Tomando como referencia el estimado de producción diaria de energía en kWh de cada panel según el mes, se estableció la producción de energía mensual y anual de la planta fotovoltaica. Para realizar el análisis se tomará en cuenta que el proyecto venderá en el mercado de oportunidad la producción completa.

En lo referente al precio se analizó el precio marginal del mercado a términos de la compra de energía, según históricos al 2021, precio POE tiene un valor promedio actual de 126 USD/MWh. Conforme a los contratos de licitación abierta se estima un promedio de los últimos años para la oferta de 153 USD/MWh, estos contratos pueden tener una duración máxima de 15 años.

Al evaluar las dos opciones se toma la decisión de tomar un contrato, ya que el POE es menor y se prevé que este se reduzca en el futuro; con el contrato se mantendrá el precio estable durante los próximos 15 años.

Tabla 18.*Producción e ingresos de la planta solar*

MES	DIAS DEL MES	POTENCIA DE PANEL (Kw)	PRODUCCION MENSUAL (Kwh)
Enero	31	1.73	53.62
Febrero	28	2.25	63.11
Marzo	31	2.27	70.35
Abril	30	2.45	73.45
Mayo	31	2.28	70.54
Junio	30	2.02	60.59
Julio	31	2.21	68.54
Agosto	31	2.33	72.26
Septiembre	30	2.27	68.08
Octubre	31	1.99	61.65
Noviembre	30	1.83	54.95
Diciembre	31	1.64	50.85
PRODUCCION ANUAL DE UN PANEL (Kw)			768.01
Paneles Totales (Unidades)			30000
Potencia Total Instalada (kW)			23040289
Potencia Instalada (MW)			23040
PRECIO DE VENTA (USD)		\$	153
TOTAL DE INGRESOS		\$	3,525,164

Nota. La tabla 18 describe la producción e ingresos para establecer una planta solar. Elaboración propia, realizado con Excel.

4. ANÁLISIS FINANCIERO Y AMBIENTAL

4.1. Análisis financiero

Se establece el flujo de caja o efectivo para cada año, hasta el año 15. Según la finalización del contrato.

Tabla 19.

Flujo de caja y estimación de TIR y VAN

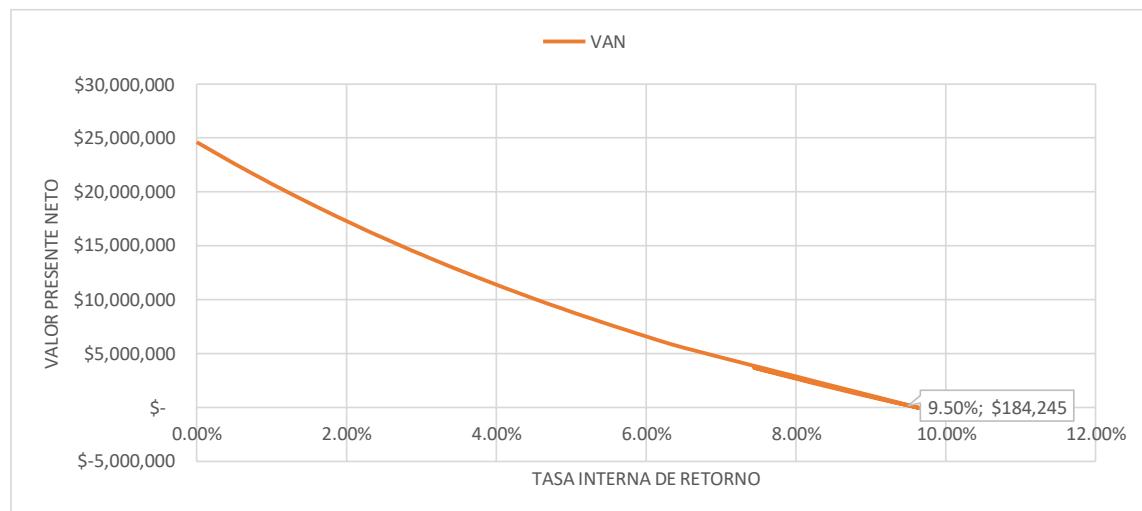
AÑO	FLUJO DE CAJA	TASA	VAN
0	-26470612	0.00 %	\$ 24,604,238
1	3404990	0.50 %	\$ 22,617,851
2	3404990	1.00 %	\$ 20,739,753
3	3404990	1.50 %	\$ 18,962,963
4	3404990	2.00 %	\$ 17,281,002
5	3404990	2.50 %	\$ 15,687,855
6	3404990	3.00 %	\$ 14,177,937
7	3404990	3.50 %	\$ 12,746,057
8	3404990	4.00 %	\$ 11,387,386
9	3404990	4.50 %	\$ 10,097,434
10	3404990	5.00 %	\$ 8,872,020
11	3404990	5.50 %	\$ 7,707,251
12	3404990	6.00 %	\$ 6,599,498
13	3404990	6.50 %	\$ 5,545,381
14	3404990	9.63 %	\$ -8,059
15	3404990	7.50 %	\$ 3,585,642
		8.00 %	\$ 2,674,327
		8.50 %	\$ 1,805,230
		9.00 %	\$ 975,951
TIR	9.50%	9.50 %	\$ 184,245
VAN	\$ 184,245	10.00 %	\$ -571,988

Nota. La tabla 19 describe el flujo de caja y estima el TIR y el VAN hasta el año 15. Elaboración propia, realizado con Excel.

El valor actual neto con una tasa interna de retorno de 9.5 % da un valor presente positivo de 184,245 USD, según el valor del VAN se define como un proyecto viable y rentable.

Figura 30.

Gráfica de TIR/VAN



Nota. La figura 30 muestra de forma gráfica el comportamiento de la TIR y el VAN. Elaboración propia, realizado con Excel.

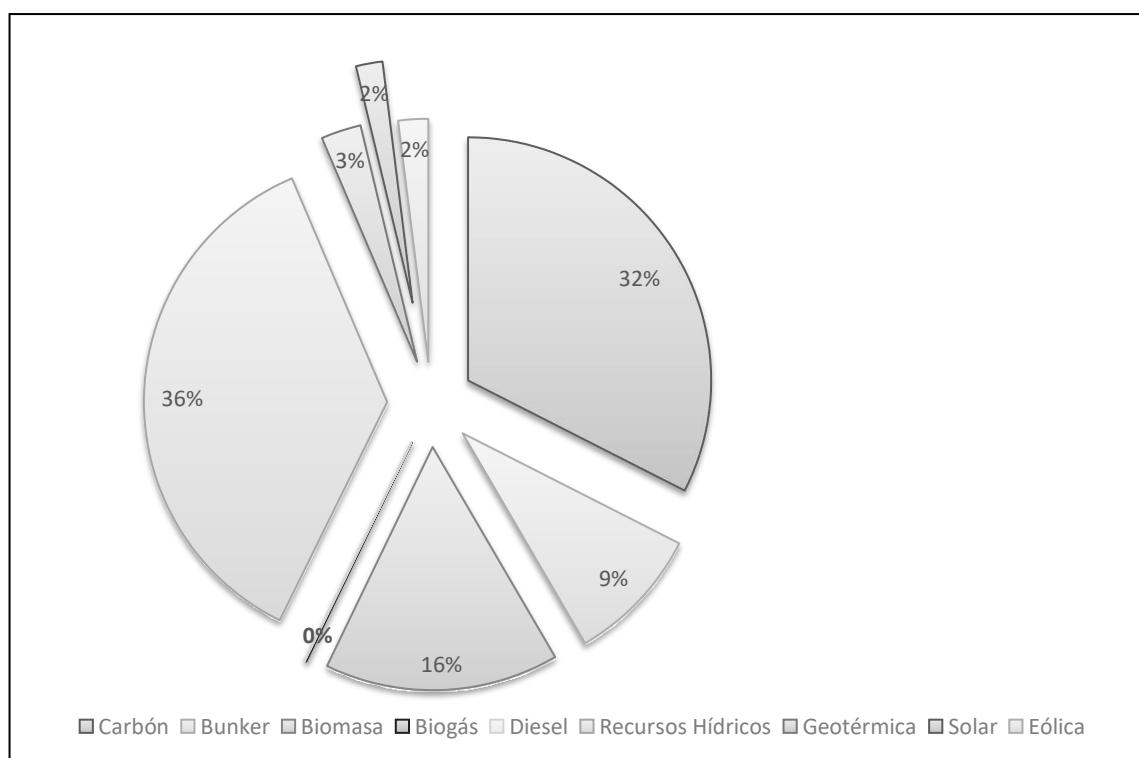
4.2. Análisis ambiental

La importancia de reducir la huella de carbono en la generación de energía radica en que vivimos en un mundo en constantes cambios y cada cambio implica el incremento en el consumo de energía. Este consumo provoca un impacto negativo en el medio ambiente, lo que hace necesario medirlo, para tomar acciones en la reducción de las emisiones de GEI para mitigar el cambio climático.

La demanda de consumo en el municipio de Chiquimula es de 10 MWh en demanda media diaria y 11.5 MWh en demanda máxima. Se muestra el gráfico de la composición actual de la matriz energética en el país, para tomarlo como base en el cálculo de las emisiones de gases efecto invernadero según la demanda de consumo.

Figura 31.

Gráfica de composición de la matriz energética por tipo de tecnología



Nota. La figura 31 muestra como está distribuida la matriz energética, según la tecnología de producción. Obtenido de MEM. (2017). Subsector eléctrico en Guatemala. (p. 8.). Ministerio de Energía y Minas.

El Ministerio de Energía y Minas publicó los factores de emisión de GEI por generación eléctrica, según la fuente.

Tabla 20.*Coeficientes de emisiones de CO₂e por tipo de combustible*

Generación por tipo de combustible	Coeficiente de emisión [Kg CO₂e/KWh]
CARBÓN MINERAL	1.3173
FUEL OIL	0.6641
BAGAZO DE CAÑA	0.0604
BIOGÁS	0.0007
DIESEL OIL	0.7814
LEÑA	0.1515
HIDROENERGÍA	0.0000
GEOENERGÍA	0.0000
SOLAR FOTOVOLTAICA	0.0000
EÓLICA	0.0000

Nota. Coeficiente de emisiones en Kg CO₂e/KWh para cada tipo de combustible. Obtenido de MEM. (2017). Subsector eléctrico en Guatemala. (p. 9.). Ministerio de Energía y Minas.

Se evalúan las emisiones de GEI según el consumo de energía eléctrica mensual en el municipio a través de los factores de emisión de Kg CO₂e de la generación de energía eléctrica.

Tabla 21.*Emisiones de GEI en Kg CO₂e de generación por tipo de combustible*

GENERACION POR TIPO DE COMBUSTIBLE			EMISIONES DE GEI			
Demanda MWh	Generación en MWh	% Que representa generación	Tecnología	Generación en KWh	Coeficiente de emisión de CO ₂ e [Kg CO ₂ e/KWh]	Kg CO ₂ e
11.5						
Carbón	3.74	32.48 %	Carbón	3735.20	1.17	4363.46
Bunker	1.05	9.11 %	Bunker	1047.65	0.61	643.57
Biomasa	1.79	15.56 %	Biomasa	1789.40	0.03	46.52
Biogás	0.01	0.08 %	Biogás	9.20	0.00	0.01
Diesel	0.01	0.05 %	Diesel	5.75	4.71	27.11
Recursos Hídricos	4.18	36.32 %	Recursos Hídricos	4176.80	0.00	0.00
Geotérmica	0.31	2.66 %	Geotérmica	305.90	0.00	0.00
Solar	0.20	1.76 %	Solar	202.40	0.00	0.00
Eólica	0.23	1.98 %	Eólica	227.70	0.00	0.00
Total	11.50	100.00 %				5080.67

Nota. Emisiones de GEI en Kg CO₂. Elaboración propia, realizado con Excel.

Se determinó que la cantidad de emisiones de gases efecto invernadero que se reducirían al consumir energía eléctrica generada a través del potencial solar ya identificado es de 5,080 Kg CO₂e diarios. Esto lograría ralentizar el ritmo del cambio climático. Lo que implica un impacto positivo y significativo para el medio ambiente.

5. RESULTADOS

Los resultados del estudio se muestran según el orden en el que se realizó.

5.1. Estimación y clasificación del potencial solar

El potencial solar se estimó por medio del modelo de descomposición de series de tiempo con modelo multiplicativo y tendencia más estacional. A continuación, se presenta el pronóstico obtenido con el modelo:

Tabla 22.

Promedio real y pronóstico radiación solar Wh/m²

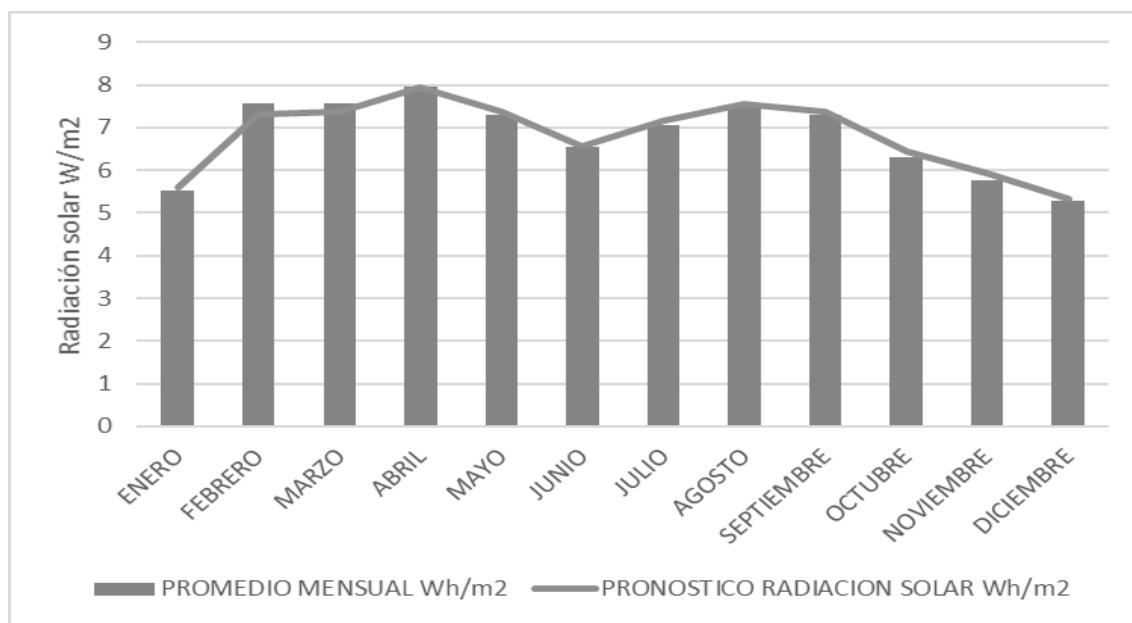
MES	PROMEDIO MENSUAL Wh/m ²	PRONOSTICO RADIACION SOLAR Wh/m ²
ENERO	5.53	5.61
FEBRERO	7.57	7.31
MARZO	7.55	7.36
ABRIL	7.95	7.94
MAYO	7.28	7.38
JUNIO	6.53	6.55
JULIO	7.04	7.17
AGOSTO	7.49	7.56
SEPTIEMBRE	7.29	7.36
OCTUBRE	6.29	6.45
NOVIEMBRE	5.76	5.94
DICIEMBRE	5.27	5.32
PROMEDIO ANUAL	6.79	6.83

Nota. La tabla 22 describe el promedio mensual real y el pronóstico de radiación solar durante un año completo y su promedio. Elaboración propia, realizado con Excel.

El siguiente gráfico muestra el comportamiento de la radiación solar a lo largo del año. Lo que podemos observar es que el pronóstico se ajusta muy bien al promedio real de los últimos años.

Figura 32.

Gráfico del promedio real y el pronóstico de radiación solar (Wh/m²)



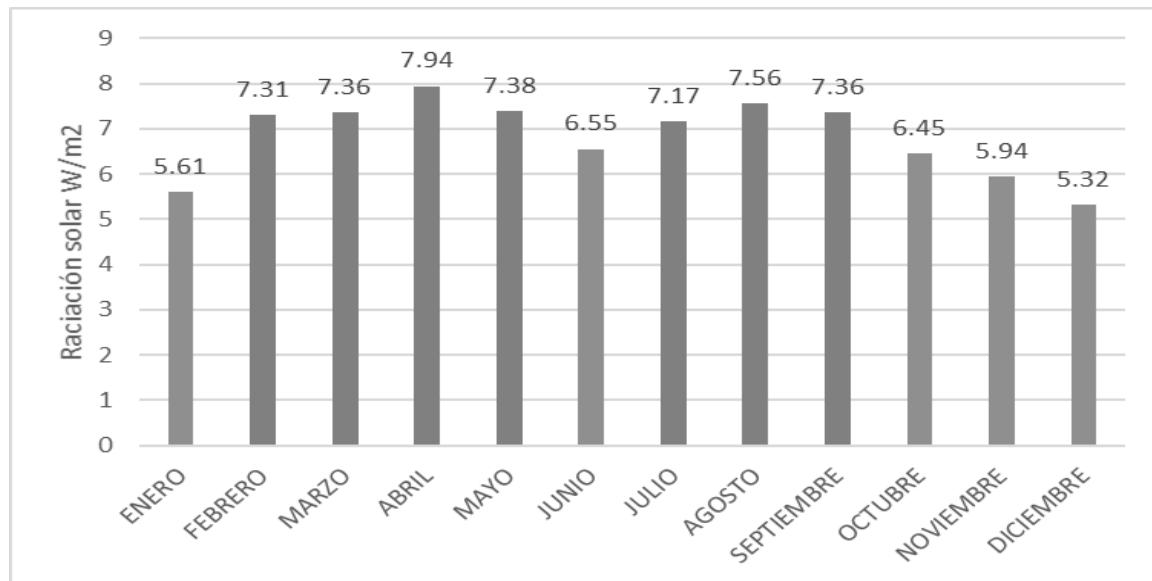
Nota. La figura 32 muestra de forma gráfica el promedio real y el pronóstico de la radiación solar durante todo un año. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.1.1. Clasificación del potencial solar mensual

De acuerdo con el nuevo modelo de estadísticas energéticas en Guatemala el potencial solar se puede clasificar en pobre, marginal, moderada, buena y excelente. La siguiente tabla muestra la clasificación del potencial solar según el mes.

Figura 33.

Clasificación del potencial solar



Nota. La figura 33 muestra el potencial solar mensual durante todo un año. Elaboración propia, realizado con Excel.

En la figura se puede observar los meses que cuentan con excelentes condiciones y los que cuentan con óptimas condiciones para el aprovechamiento.

5.2. Diseño de planta solar fotovoltaica

Actualmente las energías renovables en Guatemala tienen un 75 % de participación dentro de la matriz energética, de ese porcentaje el 1.4 % corresponde al aprovechamiento de energía solar. Esto muestra la oportunidad que tenemos para aprovechar esta fuente de energía.

Conociendo brevemente el contexto actual y los datos publicados por el AMM la demanda media para el municipio es de 10 MW de potencia.

Se realizó el diseño y las proyecciones financieras para un proyecto de producción de energía renovable (planta solar fotovoltaica).

Tabla 23.

Inversión inicial, costo operativo e ingresos proyectados.

INVERSIÓN INICIAL	MONTO (USD)
Equipo	\$ 25,865,039
Terreno	\$ 100,000
MO Construcción e Instalación	\$ 385,625
Asesoría y expertos	\$ 119,948
TOTAL	\$ 26,470,612
COSTO OPERATIVO ANUAL	\$ 120,130
INGRESOS PROYECTADOS ANUALES	\$ 3,525,164

Nota. La tabla 23 muestra el resumen financiero de la puesta en marcha del proyecto.

Elaboración propia, realizado con Excel.

5.3. Análisis financiero y ambiental

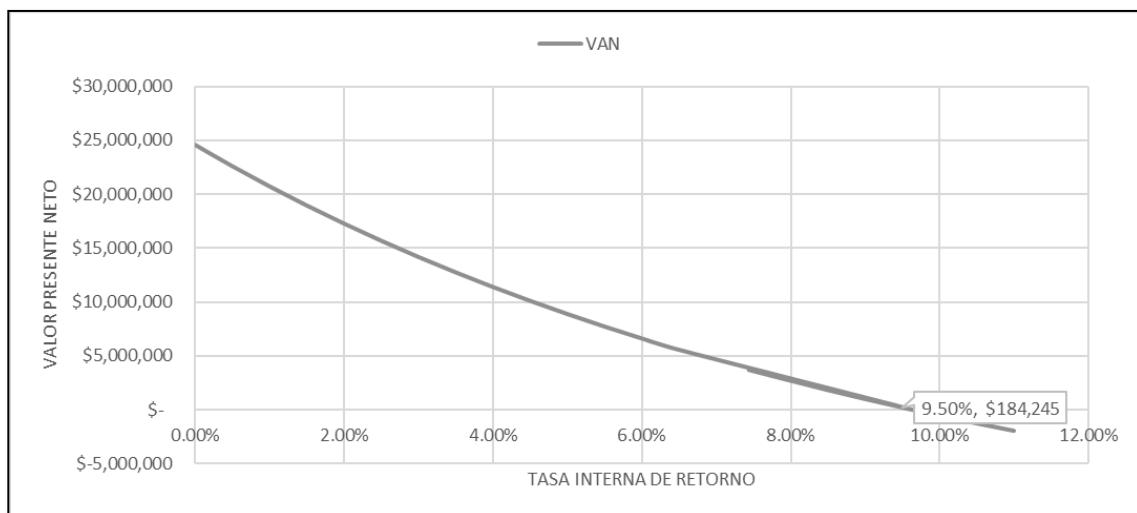
Para analizar los impactos financieros y ambientales para el proyecto de generación de energía eléctrica (planta solar fotovoltaica), se calculó la tasa interna de retorno (TIR), el valor presente neto (VAN) y las emisiones de gases efecto invernadero en Ton CO₂e.

5.3.1. Análisis financiero

Para determinar si el proyecto es rentable se tomó el flujo de caja y se estimó la tasa interna de retorno y el valor presente neto.

Con una tasa de 9.5 % da un valor presente positivo de 184,245 USD, según el valor del VAN se define como un proyecto viable y rentable.

Figura 34.
Gráfica de TIR/VAN



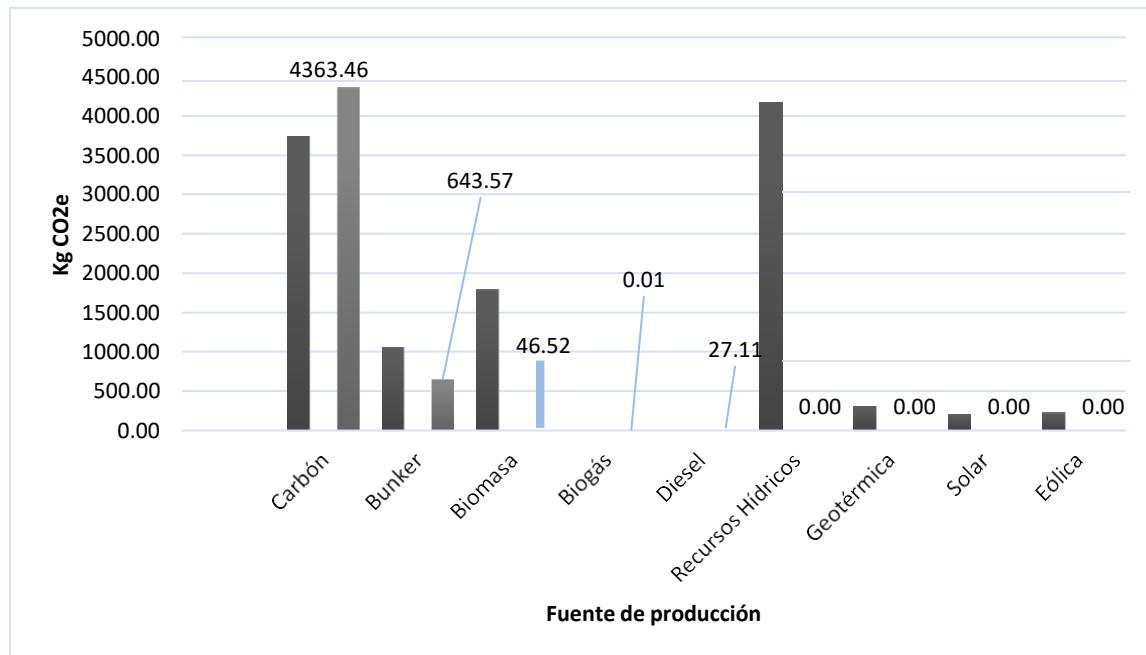
Nota. La figura 34 muestra el comportamiento de la TIR y el VAN. Elaboración propia, realizado con Excel.

5.3.2. Análisis ambiental

Las emisiones diarias de GEI para la generación de 10 MW de potencia actualmente, según la composición de la matriz energética se describe a través de la siguiente gráfica.

Figura 35.

Emissions de Kg CO₂e según fuente de producción



Nota. La figura 35 muestra la cantidad de emisiones de Kg CO₂e según el tipo de combustible utilizado. Elaboración propia, realizado con Excel.

6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En Guatemala, el mercado eléctrico ha experimentado cambios significativos en los últimos años, abriendo oportunidades para la integración de fuentes de energía renovable, en proyectos fotovoltaicos se debe considerar el panorama actual del mercado eléctrico guatemalteco, las oportunidades, beneficios y desafíos específicos que enfrenta la energía solar fotovoltaica derivado de las limitaciones asociadas con su generación intermitente debido a las variables climáticas.

El mercado eléctrico guatemalteco se caracteriza por la participación de diversos actores, entre ellos los generadores, quienes declaran los costos de energía, mantenimiento y combustible. Esta dinámica competitiva presenta una oportunidad para la energía solar fotovoltaica. Sin embargo, es importante tener en cuenta que, actualmente, la energía solar fotovoltaica solo puede participar en la venta de energía y no en los contratos de respaldo de potencia.

La energía solar fotovoltaica se destaca como una opción atractiva dentro del mercado guatemalteco debido a una serie de factores. En primer lugar, Guatemala cuenta con abundante radiación solar, lo que la convierte en un recurso natural valioso para aprovechar esta tecnología. Además, la energía solar fotovoltaica es una fuente de energía limpia y renovable, contribuyendo a la reducción de las emisiones de gases de efecto invernadero y al cumplimiento de los objetivos de mitigación del cambio climático.

No obstante, la generación intermitente de la energía solar fotovoltaica es uno de los desafíos principales a los que se enfrenta en el mercado guatemalteco.

La producción de energía solar está sujeta a las variables climáticas del lugar, lo que implica fluctuaciones a lo largo del día y una influencia significativa de condiciones como la nubosidad, la lluvia y la estacionalidad. Esta intermitencia plantea desafíos en términos de estabilidad y confiabilidad del suministro eléctrico.

Al realizar el análisis estadístico de series temporales a la variable climática, radiación solar se determinó que el potencial energético es óptimo para desarrollar esta clase de tecnología el área estudiada. Según la clasificación del nuevo modelo de estadísticas energéticas de Guatemala, siete meses se clasifican como excelentes y cinco meses como buenos. El potencial solar en el municipio de Chiquimula en promedio anual es de 6.83 KWh/m².

Según la estimación del potencial solar, el diseño de una planta solar fotovoltaica en el municipio de Chiquimula es viable económicamente ya que el precio de la tecnología fotovoltaica está en constante descenso y permite tener una oportunidad de ganancia, para el 2017 se redujo en un 72 % según PVInsigh.

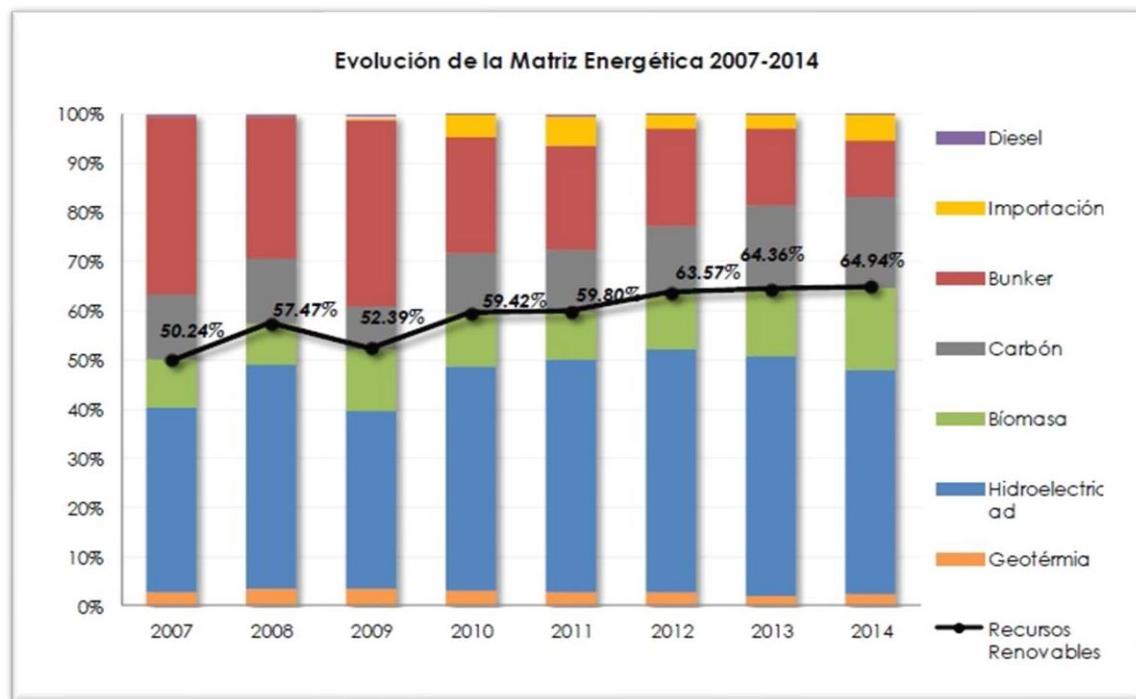
El mayor inconveniente de la instalación de una planta solar fotovoltaica se encuentra en la inversión, esta es muy alta. Sin embargo, la tasa interna de retorno es atractiva (9.5 %) para posibles inversionistas. Es importante seleccionar cuidadosamente el equipo requerido para el diseño, estableciendo las características específicas de la ubicación que tendrá la planta solar. Siempre se debe tomar en cuenta que se deben realizar pruebas con el equipo en el lugar para tener datos más certeros al momento de proyectar.

La energía solar es una forma adecuada para cubrir las necesidades de la población, lo que hace importante el conocimiento del potencial solar en la región. Para Guatemala el promedio diario es de 5.3 KWh/m², con el que se puede

proyectar al país como una región que cuenta con la oportunidad de explotar este recurso renovable. Tomando en cuenta que el país está viviendo una transición en la matriz energética, ya que el incremento de generación de energía a través de fuentes renovables está en crecimiento, esto lo muestra el siguiente gráfico:

Figura 36.

Gráfico Evolución de la matriz energética 2007 al 2014

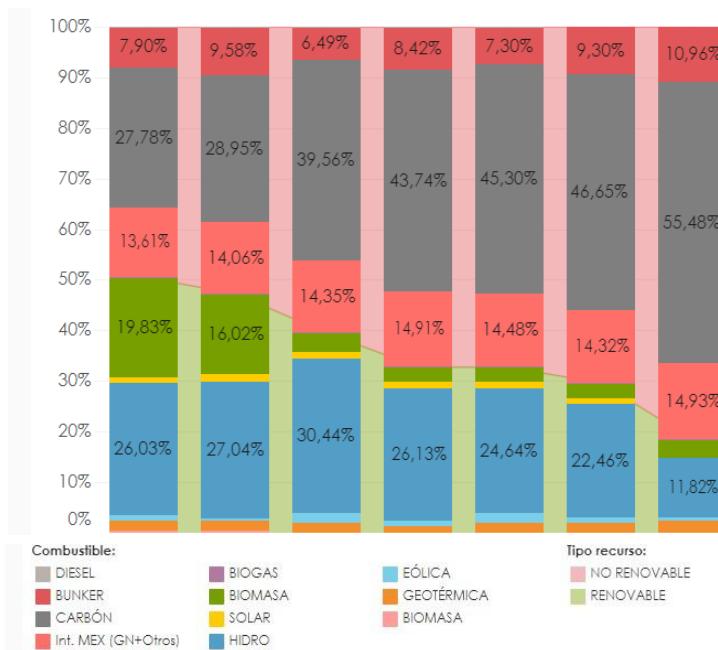


Nota. La figura 36 muestra cómo ha evolucionado la matriz energética a lo largo de los años. Obtenido de CNEE. (s.f.). *Matriz histórica de generación.* (<https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?p=3293>). Consultado el 2 de octubre de 2022. De dominio público.

Actualmente la matriz energética se compone el 70 % de generación a través de recursos renovables. Esto permite contribuir en la reducción del uso de recursos no renovables para la generación de energía.

Figura 37.

Matriz de generación de energía eléctrica, de la semana 36 a la 39 del 2021



Nota. La figura 37 muestra la composición de la matriz energética en la semana 36 a la 39 del año 2021. Obtenido de CNEE. (s.f.). *Matriz histórica de generación.* (<https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?p=3293>). Consultado el 2 de octubre de 2022. De dominio público.

Con este análisis se determinó que el beneficio ambiental obtenido al generar energía eléctrica a través de energía solar permite evitar 5080 Kg CO₂e diarios según la demanda promedio actual. Si el consumo de energía eléctrica sigue su crecimiento, esto significa que el aprovechamiento del potencial solar permitiría reducir las emisiones de manera dramática.

CONCLUSIONES

1. El potencial para la generación de energía solar en el municipio de Chiquimula es de 6.83 W/m^2 . Lo que indica que es apto para generar energía renovable, debido a los beneficios que traería la instalación de una planta de generación de este tipo los impactos económico y ambiental son positivos para la población.
2. El valor mayor de la radiación solar se da en el mes de abril, alcanzando los 7.94 W/m^2 y la menor radiación solar en el mes de diciembre con 5.32 W/m^2 . Según estos resultados el área es apta ya que se clasifican entre el rango de buena y excelente para la generación de energía fotovoltaica.
3. El diseño de una planta solar fotovoltaica es viable en el municipio de Chiquimula, según el pronóstico estimado. Así mismo, el análisis de la tasa interna de retorno nos da un valor de $\text{TRI} = 9.5\%$ y el valor presente neto es positivo en $\text{VAN} = \$184,245.00$, con estos valores se muestra una buena oportunidad para seguir profundizando en los estudios y evaluaciones requeridas para su posible ejecución.
4. Las emisiones de gases efecto invernadero en Ton CO₂e que se evitarían con el aprovechamiento del recurso solar, sería de 1,828 Ton CO₂e anuales, considerado un fuerte beneficio ambiental para la reducción de GEI.

RECOMENDACIONES

1. Propiciar por parte de la Universidad de San Carlos, la colaboración de la con el MEM, MINFIN y entidades privadas para realizar estudios y proyectos de energías renovables, de esta manera se desarrollarán profesionales expertos en el área.
2. Tener un canal de fácil acceso a la información que necesitan las personas interesadas en invertir en energía solar.
3. Contar con un laboratorio de energías renovables. Para mostrar el funcionamiento y enseñar la utilización de equipos a baja escala principalmente de paneles fotovoltaicos y equipos eólicos, así como modelos a escala de hidroeléctricas, que funcionen.
4. Brindar más información sobre las entidades que brindan apoyo financiero para la ejecución de proyectos y los procedimientos que estos requieren.

REFERENCIAS

- Alvarado, M. (2017). *Diseño de un SCADA para la Monitorización de una Solución Solar Fotovoltaica con Baterías.* SILO. <https://silo.tips/download/diseo-de-un-scada-para-la-monitorizacion-de-una-solucion-solar-fotovoltaica-con>
- Acuerdo gubernativo 281-2015. Política Nacional para la Gestión Integral de Residuos y Desechos Sólidos. Ministerio de ambiente y recursos naturales. Guatemala 15 de diciembre de 2015.
- Acuerdo Gubernativo 73-2021. Reglamento orgánico interno del Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Ministerio de Ambiente y Recursos Naturales. Guatemala 8 de abril de 2021.
- BUN-CA. (2002). *Manuales sobre energía renovable: Solar Fotovoltaica.* PNUD.
- Cables RCT. (2019). *Intensidad admisible de los conductores eléctricos de baja tensión.* Cables RCT, 2.
- Catalán, M. (2014). *Estudio de prefactibilidad técnica y económica e inserción al mercado eléctrico guatemalteco de una planta fotovoltaica de 1MW.* Guatemala: (Tesis de Licenciatura, Universidad de San Carlos de Guatemala). Archivo digital. http://biblioteca.usac.edu.gt/tesis/08/08_0863_EA.pdf

CNEE. (s.f.). *Matriz histórica de generación*. Comisión Nacional de Energía Eléctrica. <https://www.cnee.gob.gt/wordpress/?p=3293>

EATON Power Business Worldwide. (2021). *Tablero de distribución de uso general Pow-R-Line C*. EATON. <https://www.eaton.com/mx/es-mx/catalog/low-voltage-power-distribution-controls-systems/pow-r-line-c-switchboards.html>

EATON. (2019). *Low Voltage Switchboards and Switchgear*. Autor.

Estévez, R. (2013). *¿Conoces en qué consiste el GHG Protocol?* EcoInteligencia. <https://www.ecointeligencia.com/2013/05/ghg-protocol/>

Fernández, P. (s.f.). *Procesos termosolares en baja, media y alta temperatura*. Biblioteca sobre Energía Eléctrica. <https://pfernandezdiez.es/es/libro?id=3>

Generatuluz. (s.f.). *Tipos de baterías y sus características*. GL. <https://www.generatuluz.com/tu-propia-instalacion-aislada/tipos-de-baterias-y-sus-caracteristicas/>

HUP Solar Batteries. (2021). *Hup Battery Prices*. HUP. <http://www.hupsolar.com/buy-HUP-batteries-prices-pricing>

Incyt, Vrip y Universidad Rafael Landívar. (2018). *Perfil energético de Guatemala*. Universidad Rafael Landívar.

Juárez, M. (2019). Emisiones históricas de gases de efecto invernadero y sus tendencias. En A. P.-E.-A. E. J. Castellanos, *Primer reporte de evaluación*

del conocimiento sobre cambio climático en Guatemala, 228-263.
Universitaria UVG.

Maridueña, L. y Chuya, M. (2020). *El costo beneficio de un proyecto de inversión para determinar su factibilidad*. (Tesis de licenciatura, Universidad Técnica de Machala). Archivo digital.
<http://repositorio.utmachala.edu.ec/handle/48000/15464>

MEM. (2017). *Subsector eléctrico en Guatemala*. Ministerio de Energía y Minas.

Ministerio de Economía. (2017). *Perfil departamental de Chiquimula*. MINECO.

Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Subsector Eléctrico en Guatemala*. MEM.

Ministerio de Energía y Minas. (2017). *Modelo Lógico del Resultado Estratégico del Sector Energético*. MEM.

Ministerio de Energía y Minas. (2019). *Balance Energético 2019*. MEM.

Monsolar (s.f.). *¿Qué es y qué hace un regulador de carga solar?* MS.
<https://www.monsolar.com/blog/que-es-y-que-hace-un-regulador-de-carga-solar/>

Müller, A. (2013). *Heliógrafos Tipo Campbell-Stokes*. R. FUESS.

Municipalidad de Chiquimula. (2019). *Plan de Desarrollo Departamental Chiquimula*. Segeplan.

Paz, C. (2019). *Introducción a la energía solar térmica*. Secretaría de Energía.

Rivera, D. (2010). *Análisis de series temporales*. Alianza Editorial.

Svarc. (2021). *LG Solar Panels Review*. CER.

<https://www.cleanenergyreviews.info/blog/lg-solar-panel-review>.

Tiwari, G., Tiwari, A. y Shyam. (2016). *Handbook of Solar Energy: Theory, Analysis and Applications*. Springer.

Victron Energy. (2023). *Pricelist 2023 Q2 EX VAT C Euro. VE.*

https://www.victronenergy.com.es/media/pricelist/Pricelist_Victron-EURO_2023-Q2_Web.pdf

APÉNDICES

Apéndice 1.

Análisis de series temporales, modelo de tendencia lineal

Ecuación de tendencia ajustada

$$Y_t = 206.94 - 0.0074xt$$

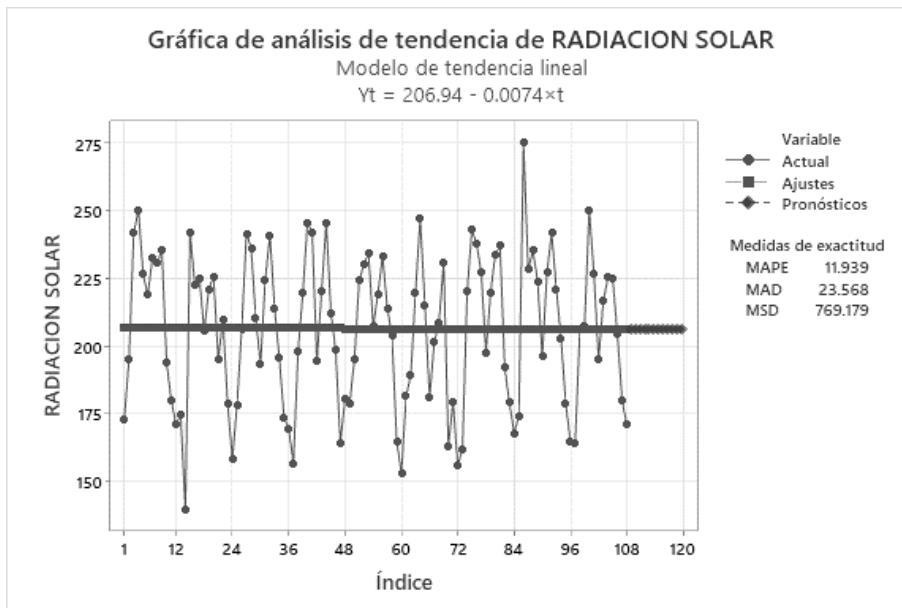
Medidas de exactitud

MAPE	11.939
MAD	23.568
MSD	769.179

Pronósticos

Período	Pronóstico
109	206.129
110	206.121
111	206.114
112	206.106
113	206.099
114	206.092
115	206.084
116	206.077
117	206.069
118	206.062
119	206.055
120	206.047

Continuación del apéndice 1.



Nota. Gráfica de análisis de tendencia de Radiación solar con el Modelo de tendencia lineal.
Elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 2.

Análisis de series temporales de tendencia con modelo de tendencia cuadrática

Ecuación de tendencia ajustada

$$Y_t = 210.12 - 0.181xt + 0.00160xt^2$$

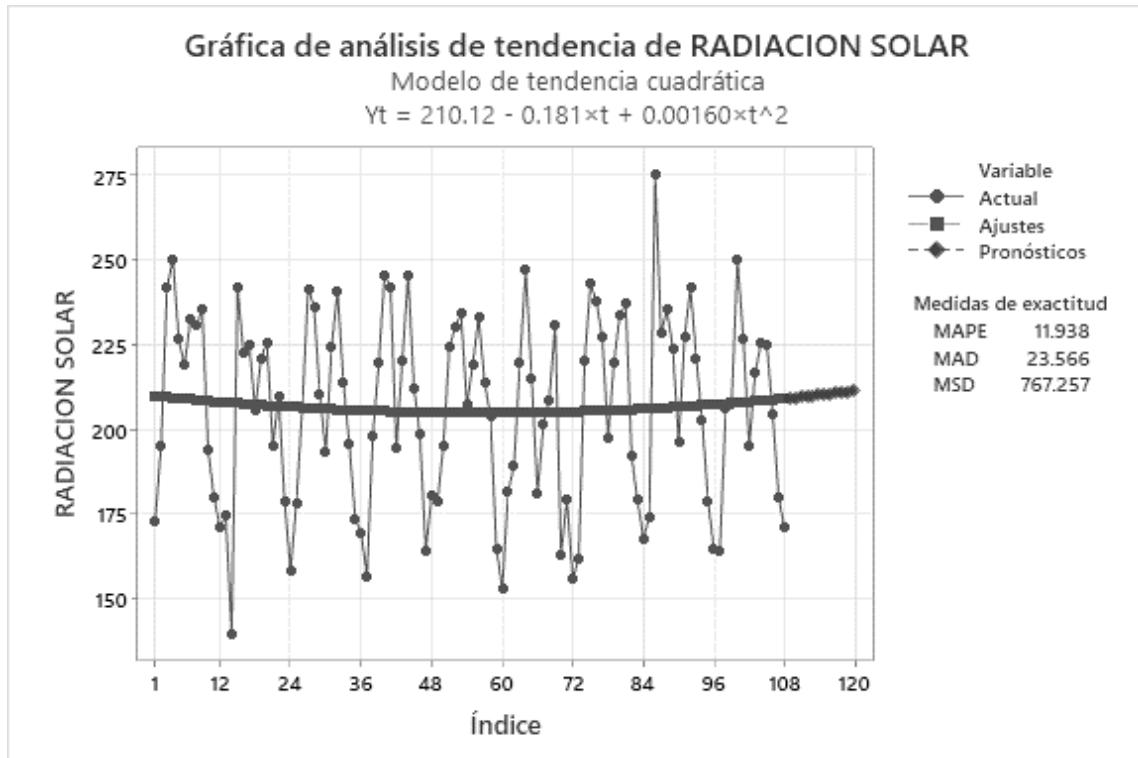
Medidas de exactitud

MAPE	11.938
MAD	23.566
MSD	767.257

Pronósticos

<u>Período</u>	<u>Pronóstico</u>
109	209.316
110	209.484
111	209.655
112	209.830
113	210.007
114	210.188
115	210.372
116	210.559
117	210.750
118	210.943
119	211.140
120	211.340

Continuación del apéndice 2.



Nota. El gráfico muestra el comportamiento de la radiación solar a través del modelo de tendencia cuadrática. Elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 3.

Análisis de series temporales de tendencia con modelo de curva de crecimiento

Ecuación de tendencia ajustada

$$Y_t = 204.895 \times (0.999974^t)$$

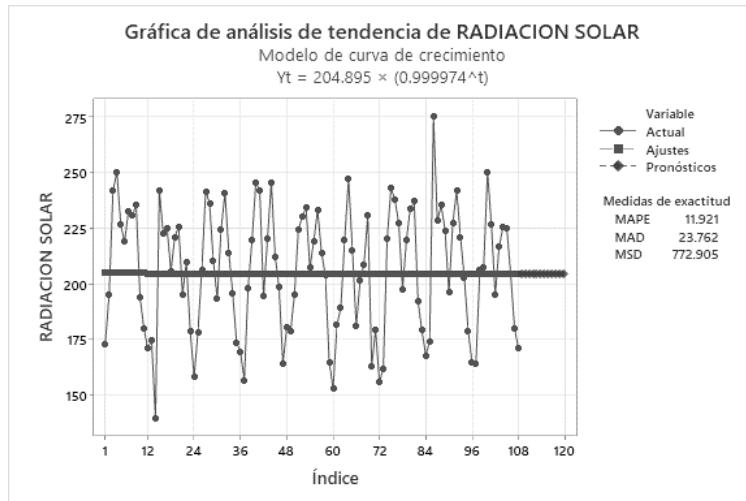
Medidas de exactitud

MAPE	11.921
MAD	23.762
MSD	772.905

Pronósticos

<u>Período</u>	<u>Pronóstico</u>
109	204.313
110	204.307
111	204.302
112	204.297
113	204.291
114	204.286
115	204.281
116	204.275
117	204.270
118	204.265
119	204.259
120	204.254

Continuación del apéndice 3.



Nota. La grafica muestra el análisis de tendencia de radiación solar con el modelo de curva de crecimiento. Elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 4.

Análisis de series temporales de descomposición de series de tiempo

Índices estacionales

<u>Período</u>	<u>Índice</u>
1	0.83752
2	0.98651
3	1.09908
4	1.14751
5	1.10219
6	0.94719
7	1.07111
8	1.12943
9	1.06403
10	0.96329
11	0.85877
12	0.79337

Medidas de exactitud

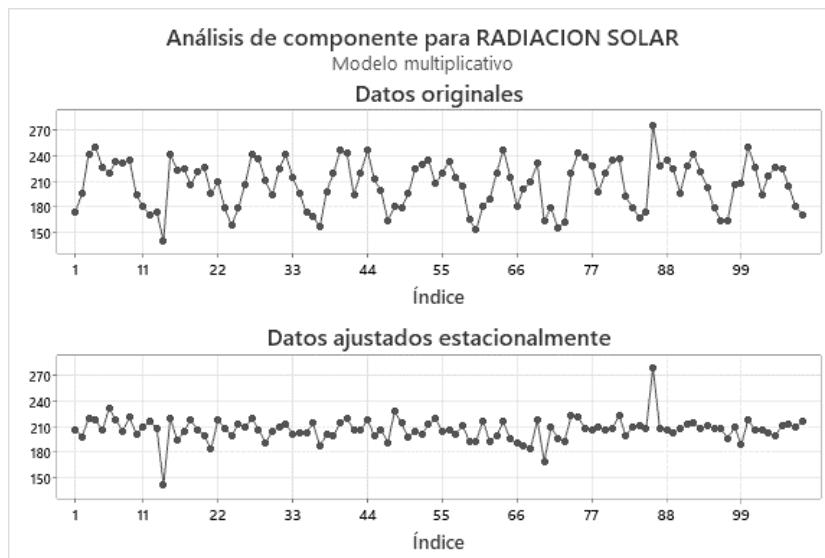
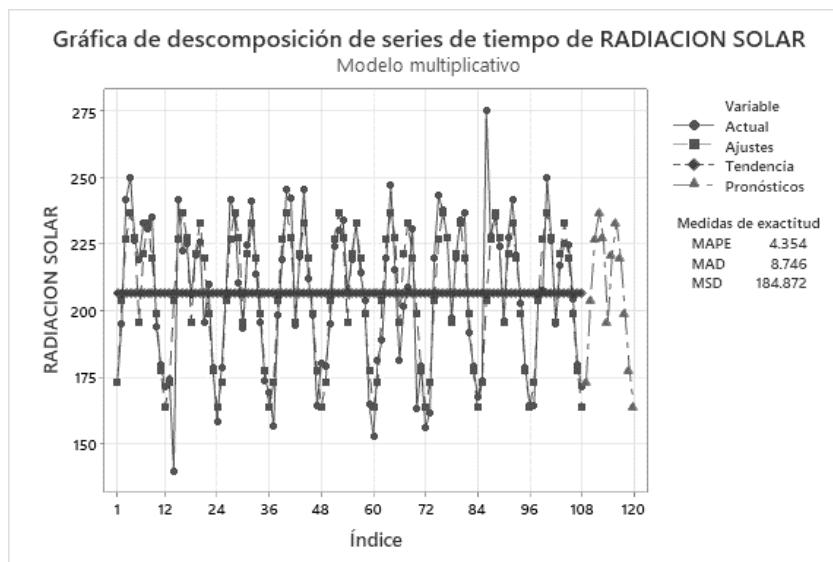
MAPE	4.354
MAD	8.746
MSD	184.872

Pronósticos

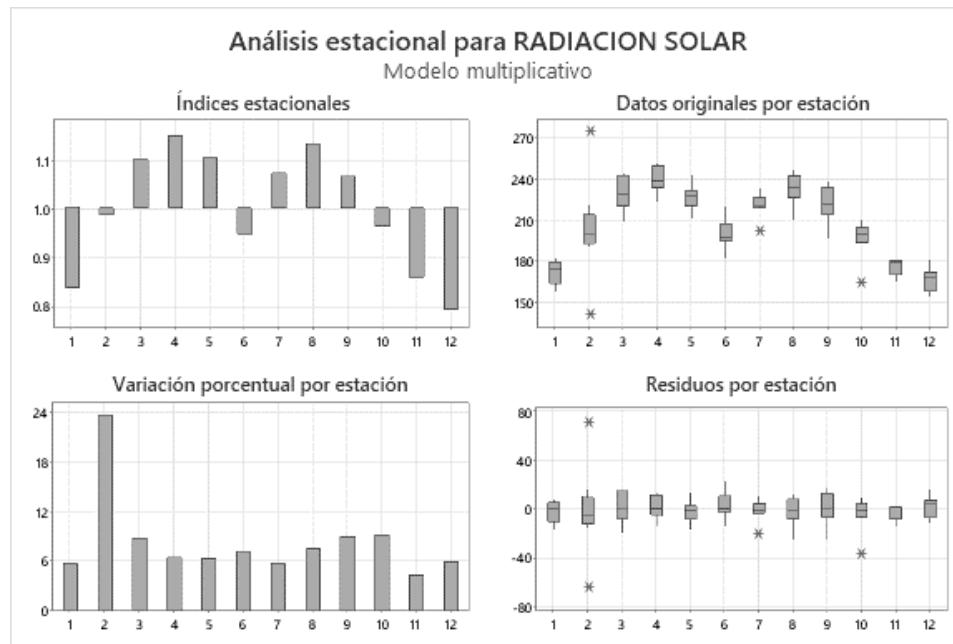
<u>Período</u>	<u>Pronóstico</u>
109	172.956
110	203.724
111	226.972
112	236.973
113	227.614
114	195.605
115	221.196
116	233.239

Continuación del apéndice 4.

117	219.733
118	198.929
119	177.345
120	163.839



Continuación del apéndice 4.



Nota. El gráfico muestra el análisis estacional para radiación solar con modelo multiplicativo.
Elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 5.

Análisis de descomposición de series de tiempo con modelo aditivo

Ecuación de tendencia ajustada

$$Y_t = 205.59 + 0.0173xt$$

Índices estacionales

<u>Período</u>	<u>Índice</u>
1	-33.7607
2	-2.6001
3	20.1645
4	30.6401
5	20.8612
6	-10.7605
7	14.9707
8	26.4823
9	13.2743
10	-7.3525
11	-28.8028
12	-43.1164

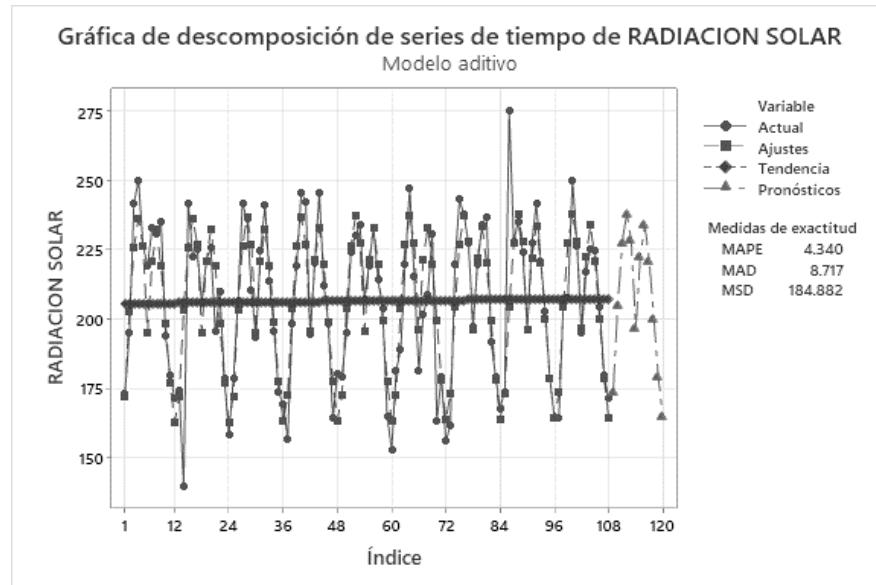
Medidas de exactitud

MAPE	4.340
MAD	8.717
MSD	184.882

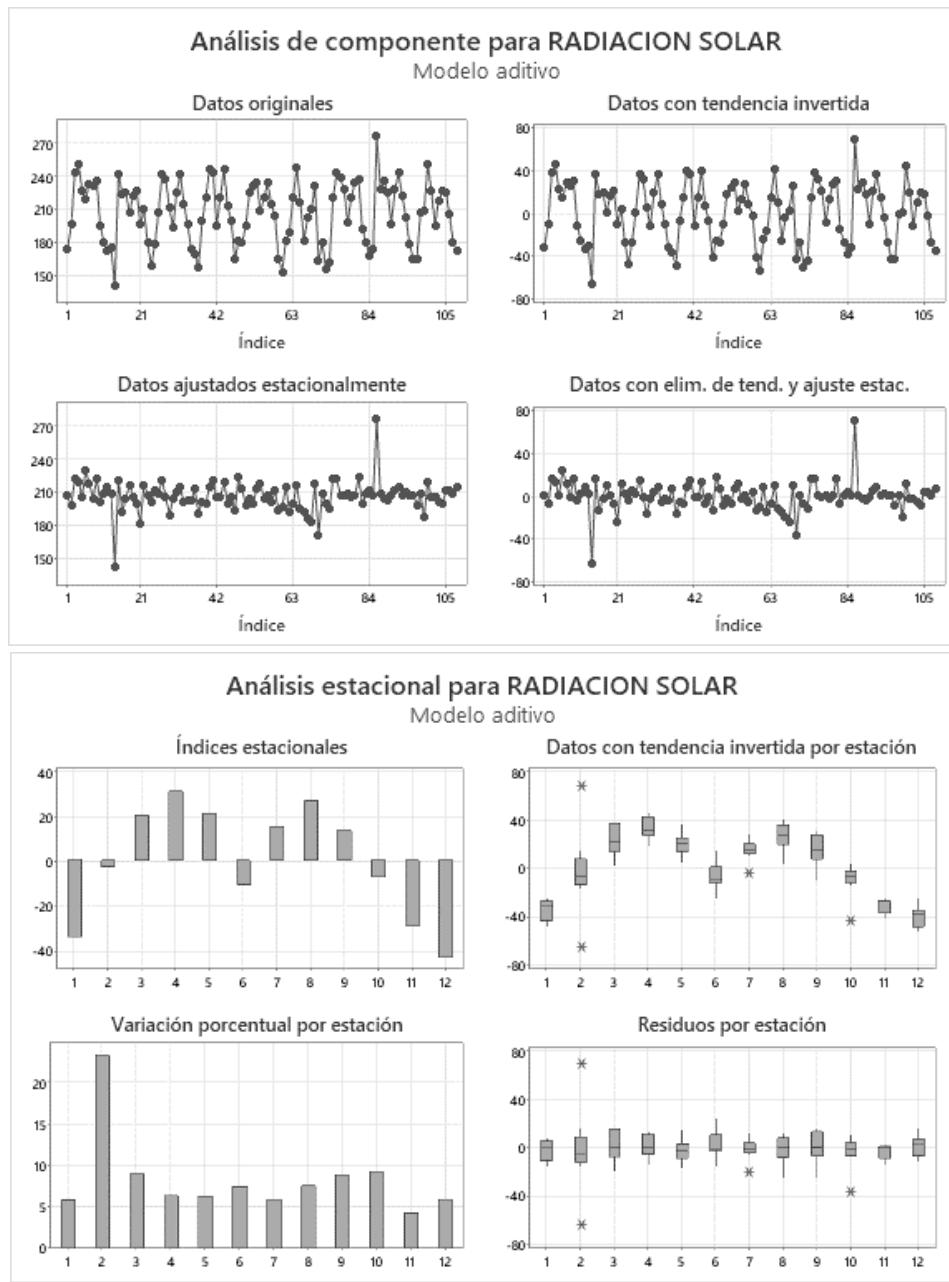
Continuación del apéndice 5.

Pronósticos

<u>Período</u>	<u>Pronóstico</u>
109	173.713
110	204.891
111	227.673
112	238.165
113	228.404
114	196.799
115	222.548
116	234.077
117	220.886
118	200.276
119	178.843
120	164.547



Continuación del apéndice 5.



Nota. Las gráficas muestran el análisis estacional para radiación solar con modelo aditivo.
Elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 6.

Modelo de descomposición con modelo aditivo más estacional

Índices estacionales

<u>Período</u>	<u>Índice</u>
1	-33.7607
2	-2.6001
3	20.1645
4	30.6401
5	20.8612
6	-10.7605
7	14.9707
8	26.4823
9	13.2743
10	-7.3525
11	-28.8028
12	-43.1164

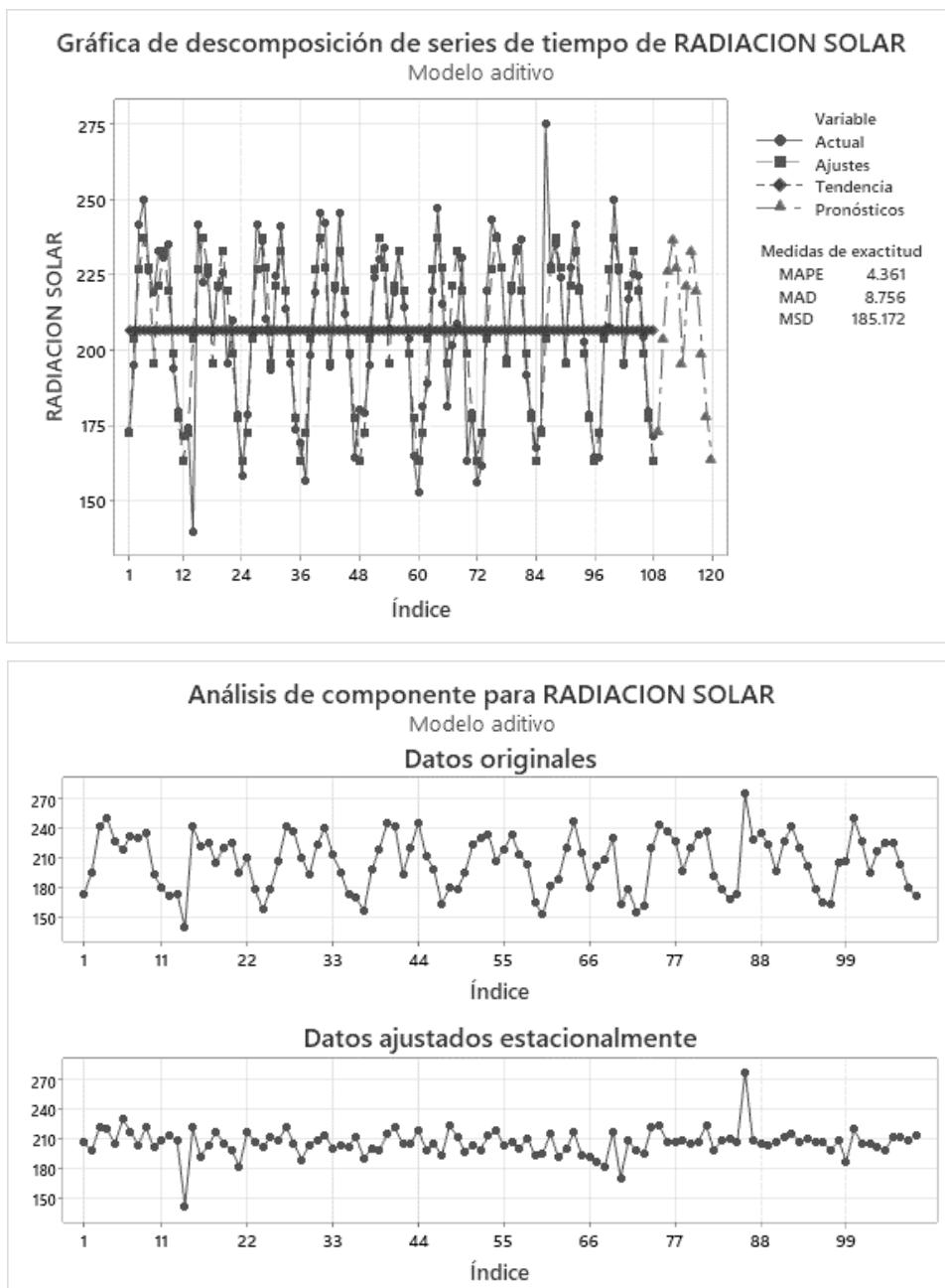
Medidas de exactitud

MAPE	4.361
MAD	8.756
MSD	185.172

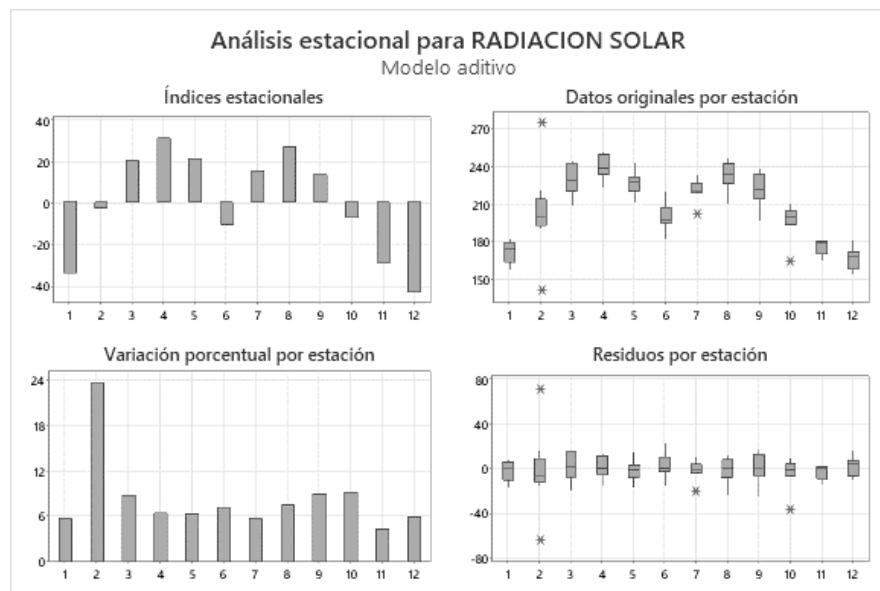
Pronósticos

<u>Período</u>	<u>Pronóstico</u>
109	172.772
110	203.933
111	226.697
112	237.173
113	227.394
114	195.772
115	221.503
116	233.015
117	219.807
118	199.180
119	177.730
120	163.416

Continuación del apéndice 6.



Continuación del apéndice 6.



Nota. El gráfico muestra el análisis estacional para radiación solar con modelo aditivo.
Elaboración propia, realizado con Word.

Apéndice 7.

Método de Winters con modelo multiplicativo

Constantes de suavización

α (nivel)	0.2
γ (tendencia)	0.2
δ (estacional)	0.2

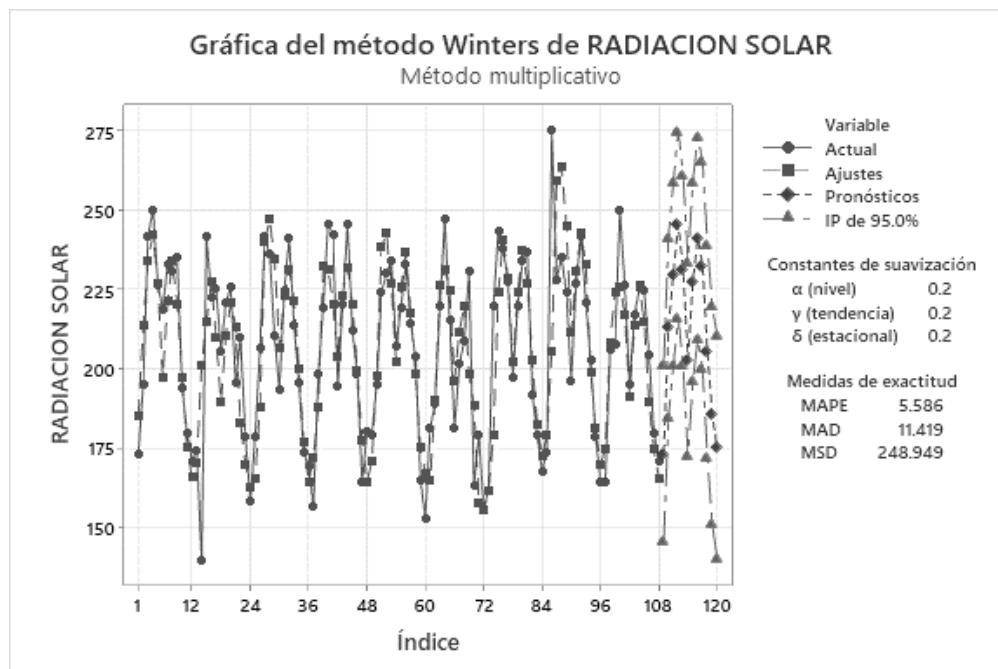
Medidas de exactitud

MAPE	5.586
MAD	11.419
MSD	248.949

Pronósticos

Período	Pronóstico	Inferior	Superior
109	173.247	145.271	201.223
110	213.118	184.704	241.532
111	230.074	201.171	258.977
112	245.692	216.253	275.132
113	231.378	201.356	261.399
114	203.058	172.412	233.704
115	227.615	196.304	258.926
116	241.229	209.215	273.242
117	232.827	200.076	265.578
118	205.581	172.059	239.103
119	185.569	151.245	219.892
120	175.175	140.022	210.329

Continuación del apéndice 7.



Nota. El gráfico muestra el método winters de radiación solar con método multiplicativo.
Elaboración propia, realizado con Word.